



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

## NÁVRH ROTORU SYNCHRONNÍHO RELUKTANČNÍHO STROJE SPOUŠTĚNÉHO ZE SÍTĚ PRO PRŮMYSLOVÉ APLIKACE

ROTOR DESIGN OF A LINE-START SYNCHRONOUS RELUCTANCE MACHINE FOR INDUSTRIAL  
APPLICATIONS

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jakub Žíla

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Bárta, Ph.D.

BRNO 2019

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

**Student:** Bc. Jakub Žíla

**ID:** 173786

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2018/19

## NÁZEV TÉMATU:

### Návrh rotoru synchronního reluktančního stroje spouštěného ze sítě pro průmyslové aplikace

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Vytvořte literární rešerši na téma synchronních reluktančních strojů spouštěných ze sítě pro průmyslové aplikace
2. Navrhněte vhodné provedení rotoru synchronního reluktančního stroje spouštěného ze sítě
3. Navrhněte synchronní reluktanční stroj spouštěný ze sítě s využitím statoru zadaného indukčního stroje a použitím vhodně navrženého rotoru
4. Parametry navrženého stroje ověřte v programu Ansys Maxwell
5. Na vytvořeném modelu v Ansys Maxwell prostřednictvím parametrických analýz studujte vliv geometrie na vlastnosti stroje.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] J. Pyrhonen, J. Jokinen, V. Hrabovcova "Design of Rotating Electrical Machines" John Wiley & Sons, Ltd, 2008. 512 s. ISBN 978-0-470-69516-6(H/B)
- [2] A. E. Fitzgerald, Ch. Kingsley, S. Umans "Electric Machinery", McGraw-Hill Companies Inc., 2003. 688 s. ISBN 0-07-112193-5
- [3] Juha Pyrhonen, Valeria Hrabovcova, R. Scott Semken „Electrical Machine Drives Control: An Introduction“ Wiley, November 2016, ISBN: 978-1-119-26045-5

**Termín zadání:** 4.2.2019

**Termín odevzdání:** 22.5.2019

**Vedoucí práce:** Ing. Jan Bárta, Ph.D.

**Konzultant:**

**doc. Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.**  
*předseda oborové rady*

## UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

## **Abstrakt**

Tato diplomová práce pojednává o návrhu rotoru synchronních reluktančních strojů. Teoreticky je popsána geometrie rotoru synchronního reluktančního stroje respektující přirozenou cestu magnetického toku v plném rotoru. Je vytvořen parametrický model rotoru za pomoci spolupráce programů ANSYS Maxwell a Matlab. S použitím stejného softwaru jsou ověřeny parametry zkoumaného stroje. Na závěr je pozorován vliv změn geometrie rotoru na výstupních parametrech stroje.

## **Klíčová slova**

Synchronní reluktanční stroj, geometrie, rotor, parametrický model, analýza

## **Abstract**

This diploma thesis deals with design of rotor of synchronous reluctance machines. There is a theoretical description of rotor geometry of synchronous reluctance machine that respects natural flow of magnetic flux inside complete rotor. The parametric model of rotor is made with usage of ANSYS Maxwell and Matlab software. Furthermore, the parameters of the machines are confirmed using the same program. Finally, changes of motor parameters are observed in connection with different rotor geometries.

## **Keywords**

Synchronous reluctance machine, geometry, rotor, parametric model, analysis

## **Bibliografická citace:**

ŽÍLA, Jakub. *Návrh rotoru synchronního reluktančního stroje spouštěného ze sítě pro průmyslové aplikace*. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/117562>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky. Vedoucí práce Jan Bárta.



## **Prohlášení**

„Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma: „Návrh rotoru synchronního reluktančního stroje spouštěného ze sítě pro průmyslové aplikace“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce Ing. Jana Bárty, Ph.D. a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 16. května 2019

.....

podpis autora

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Janu Bártovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne: 16. května 2019

.....

podpis autora

# Obsah

Úvod.....	1
1 Literární rešerše .....	3
1.1 Účinnostní normy .....	3
1.2 Princip magnetické reluktance.....	4
1.3 Rotor synchronního reluktančního stroje .....	5
1.4 Synchronní reluktanční motor s klecí nakrátko .....	6
1.5 Moment a výkon synchronního reluktančního motoru.....	7
1.6 Poměr indukčností v ose d a q .....	8
1.7 Fázorový diagram při zatížení synchronního reluktančního motoru .....	9
1.8 Výpočet reaktancí v ose d a q z měření naprázdno a z fázorového diagramu při zatížení.....	9
1.9 Aktuální přehled komerčně dostupných synchronních reluktančních strojů....	10
1.10 Vědecký výzkum v oblasti synchronních reluktančních strojů .....	11
2 Návrh rotoru synchronního reluktančního stroje spouštěného ze sítě .....	16
2.1 Výběr druhu rotoru .....	16
2.2 Matematický popis rotoru.....	17
2.3 Referenční rotor SynRM .....	19
2.4 Tvorba geometrie rotoru SynRM .....	20
2.4.1 Nahrání základních dat rotoru.....	21
2.4.2 Navázání propojení Ansys Maxwell a Matlab.....	22
2.4.3 Rozdíly v kódu Ansys Maxwell a Matlab .....	23
2.4.4 Nahrání proměnných do Ansys Maxwell .....	23
2.4.5 Postupné vytváření geometrie.....	24
2.4.6 Změna geometrie rotoru.....	30
3 Návrh synchronního reluktančního stroje spouštěného ze sítě s využitím statoru zadaného indukčního stroje .....	31
3.1 Zadaný indukční stroj .....	31
4 Ověření parametrů stroje v programu Ansys Maxwell .....	34
4.1 Využití rovin symetrie a nastavení okrajových podmínek .....	34

4.2	Nastavení pohybu motoru.....	35
4.3	Nastavení sítě konečných prvků .....	36
4.4	Sycení stroje .....	38
4.5	Rozběh stroje .....	38
4.6	Vypočtené hodnoty v ustáleném stavu .....	42
5	Vliv geomterie na vlastnosti stroje .....	45
	Závěr .....	52

# Seznam obrázků

Obr. 1.1: Graf účinnostních tříd čtyřpólových motorů podle normy IEC 60034-30-1 [4].....	3
Obr. 1.2: Princip magnetické reluktance [5] .....	4
Obr. 1.3: Základní typy provedení rotorů synchronních reluktančních strojů.....	5
Obr. 1.4: Druhy postupů při výrobě rotoru synchronních reluktančních strojů a) rotor s vyniklými póly b) axiálně laminovaný rotor c) příčně laminovaný rotor [8]..	6
Obr. 1.5: Náhradní schéma SynRM s klecí nakrátko v d-q souřadnicích [9] .....	6
Obr. 1.6: Závislost momentu na zátěžném úhlu .....	8
Obr. 1.7: Fázorový diagram SynRM [10].....	9
Obr. 1.8: Zkoumané varianty rotoru SynRM s hliníkovou klecí: a) Rotor se dvěma bariérami, b) Rotor se čtyřmi bariérami, c) Rotor se čtyřmi bariérami a menšími úpravami [13].....	11
Obr. 1.9: Zkoumané varianty rotoru SynRM v článku [14] .....	14
Obr. 2.1: Historický vývoj rotorů synchronních reluktančních strojů [5] .....	16
Obr. 2.2: Magnetické siločáry v plném rotoru [15] .....	17
Obr. 2.3: Určení siločáry podle polárních souřadnic [15] .....	18
Obr. 2.4: Volba různých hodnot parametru bariéry $\Delta x_i$ [15] .....	18
Obr. 2.5: Příklad geometrie se zobrazenými parametry bariér magnetického toku [15].....	19
Obr. 2.6: Referenční model rotoru SynRM .....	20
Obr. 2.7: Parametry rotoru SynRM .....	21
Obr. 2.8: Parametry bariér magnetického toku .....	22
Obr. 2.9: Přímkové tvory tvořící základ bariér magnetického toku.....	26
Obr. 2.10: Spojení oblouků bariér magnetického toku .....	28
Obr. 2.11: Kopírování ploch přes osu stroje .....	29
Obr. 2.12: Finální geometrie rotoru .....	30
Obr. 3.1: B-H křivka plechů M470-50A.....	32
Obr. 3.2: Stator zadaného indukčního stroje.....	32
Obr. 3.3: Statorové vinutí v programu RMXprt .....	33
Obr. 4.1: Použité okrajové podmínky .....	34

Obr. 4.2: Nastavení rozběhu podle pohybové rovnice.....	36
Obr. 4.3: Síť konečných prvků .....	37
Obr. 4.4: Detail sítě konečných prvků ve vzduchové mezeře.....	37
Obr. 4.5: Rozložení magnetická indukce stroje .....	38
Obr. 4.6: Otáčková charakteristika při rozběhu .....	39
Obr. 4.7: Momentová charakteristika při rozběhu .....	39
Obr. 4.8: Časový průběh ztrát .....	40
Obr. 4.9: Časový průběh ztrát v ustáleném stavu .....	40
Obr. 4.10: Časový průběh proudu při rozběhu .....	41
Obr. 4.11: Detail průběhu ustáleného proudu během jedné periody .....	42
Obr. 4.12: Průběh účinnosti a účinníku při různém zatížení .....	43
Obr. 4.13: Průběh otáček při různém zatížení .....	44
Obr. 5.1: Rozložení magnetická indukce stroje se čtyřmi bariérami magnetického toku V1 .....	45
Obr. 5.2: Rozložení magnetická indukce stroje se čtyřmi bariérami magnetického toku V2 .....	46
Obr. 5.3: Porovnání průběhu otáček pro rotor se třemi a čtyřmi bariérami.....	47
Obr. 5.4: Porovnání průběhu otáček verze V1 a V2 .....	48
Obr. 5.5: Porovnání průběhu otáček verzí V2, V3 a V4.....	49
Obr. 5.6: Porovnání průběhu otáček V5 a V6.....	50

# Seznam tabulek

Tab. 1.1: Účinnostní norma IEC 60034-30-1 .....	3
Tab. 1.2: Parametry prototypu SynRM ABB [12] .....	10
Tab. 1.3: Parametry SynRM s různými rotory a rotor indukčního motoru [13] .....	12
Tab. 1.4: Doba nárustu a ustálení při rozběhu různých druhů rotoru SynRM [14] .	14
Tab. 1.5: Data ztrát a účinností při jmenovitých otáčkách různých druhů rotorů ze studie [14] .....	15
Tab. 2.1: Rozměry referenčního rotoru SynRM .....	19
Tab. 3.1: Parametry zadaného indukčního stroje .....	31
Tab. 3.2: Geometrické rozměry zadaného indukčního stroje .....	31
Tab. 3.3: Statorové vinutí zadaného indukčního stroje .....	33
Tab. 4.1: Jednotlivé složky ztrát stroje .....	41
Tab. 4.2: Vypočítané hodnoty stroje v ustáleném stavu .....	43
Tab. 5.1: Přehled rozměrů různých variant rotoru .....	50
Tab. 5.2: Porovnání ztrát, účinníku a účinnosti všech zkoumaných verzí rotoru .....	51

# ÚVOD

V dnešní době se musí lidé po celém světě stále více zabývat klimatickými změnami, se kterými je spojené tání ledovců, zvyšování hladin oceánů a vymírání ohrožených živočišných i rostlinných druhů. Je otázkou, do jaké míry mohou za tyto výkyvy klimatu činnosti člověka. Existují však měřitelné parametry, které lze dlouhodobě sledovat a vyčíst z nich příspěvek aktivit prováděných člověkem k celkové změně klimatu.

Jedním z mnoha sledovaných ukazatelů je přítomnost oxidu uhličitého ( $\text{CO}_2$ ), který vzniká při spalování fosilních paliv a patří mezi skleníkové plyny. Tyto látky odrážejí sluneční záření zpět k zemskému povrchu a zvyšují tím jeho teplotu i teplotu atmosféry. Pro snížení koncentrace oxidu uhličitého bylo svoláno mnoho konferencí za účasti všech světových mocností a zavedeno spoustu protiopatření.

Prvotní myšlenkou je omezení spalování fosilních paliv, které jsou ve velké míře používány pro výrobu elektrické energie. Při snaze snížit celosvětovou spotřebu elektrické energie postupně došlo i na elektrické pohonné systémy. Nyní tyto soustavy spotřebují více než polovinu veškeré elektrické energie a 30 % celosvětové elektrické energie je odebíráno průmyslovými pohony. Podle budoucích modelů by se v roce 2040 mohla spotřeba elektrické energie pro motory z dnešní hodnoty až zdvojnásobit, a proto dochází k silnému legislativnímu tlaku na zvýšení účinnosti elektrických pohonů, a tím pádem ke snížení jejich spotřeby. V dnešní době spadá devět z deseti prodaných elektrických průmyslových motorů pod některý z povinných legislativních standardů týkajících se jejich účinnosti. [1] V Evropě se používá norma IEC 60034-30-1, která je v této práci stručně popsána.

Nejvíce zastoupeným typem motoru v průmyslu je třífázový asynchronní motor s klecí nakrátko, který dominuje jednoduchostí výroby a nízkou poruchovostí. Při snaze o další navýšení účinnosti však došli výrobci k mechanickým limitům tohoto typu motoru. Zvýšení účinnosti by se dalo dosáhnout použitím materiálů s lepšími vlastnostmi. Podle [2] jsou však tyto materiály velmi drahé, a proto se vývoj začal otáčet směrem



k jiným typům motorů, jako jsou například synchronní stroje s permanentními magnety nebo synchronní reluktanční stroje.

Směrem synchronních reluktančních motorů se ubírá i vývoj zavedených firem jako např. Siemens nebo ABB. Hlavní výhodou synchronních reluktančních motorů je absence Jouleových ztrát v rotoru díky absenci vinutí rotoru. Z menších ztrát logicky vychází vyšší účinnost, a tím pádem lepší parametry motoru. Realita však není tak jednoduchá a synchronní reluktanční motor má bohužel i některé nevýhody. Podle [3] je největší z nich nižší účinník v porovnání s klasickým asynchronním motorem.

Tato práce se věnuje návrhu rotoru synchronního reluktančního stroje spouštěného ze sítě. V první části práce je vytvořena literární rešerše na toto téma. Dále je za pomoci spolupráce programů ANSYS Maxwell a Matlab navržen rotor stroje a sestaven jeho počítačový model. Použitím stejného softwaru jsou ověřeny parametry zkoumaného stroje. V poslední části jsou vytvořeny různé geometrie rotoru a na jejich základě jsou sledovány změny výstupních parametrů stroje.

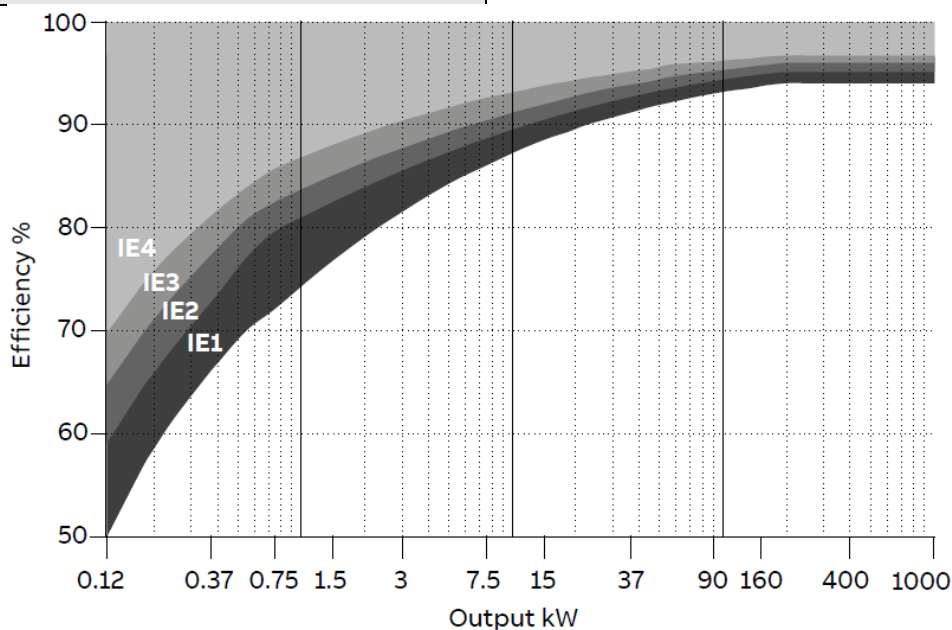
# 1 LITERÁRNÍ REŠERŠE

## 1.1 Účinnostní normy

Jak už bylo zmíněno v úvodu této práce, podle [4] byla evropská norma IEC 60034-30-1 vydána Mezinárodní elektrotechnickou komisí (International Electrotechnical Commission - IEC) 6. března 2014. Tato norma stanovuje účinnostní normy pro jednorychlostní jedno i třífázové motory pracující na frekvenci 50 nebo 60 Hz s jmenovitým napětím od 50 V do 1 kV a výkonem od 120 W do 1000 kW s pracovní teplotou okolí od -20 °C do +60 °C a pracovní nadmořskou výškou do 4000 m.n.m. Oproti starší verzi z roku 2008 tato norma rozšiřuje svou působnost i na 8-pólové motory a zabírá tak škálu 2 až 8-pólových motorů, 10-pólové motory zatím do této normy nepatří. Ve variantě z roku 2014 byla představena super-prémiová třída IE4. Rozdílné účinnostní třídy jsou vypsané v následující tabulce:

**Tab. 1.1: Účinnostní norma IEC 60034-30-1**

Super-prémiová účinnost	IE4
Prémiová účinnost	IE3
Vysoká účinnost	IE2
Standartní účinnost	IE1

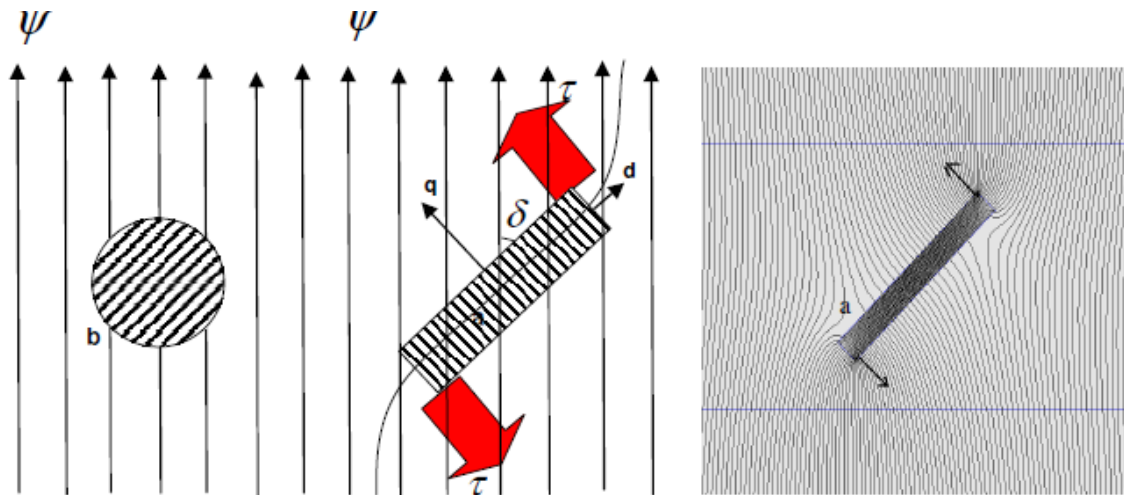


**Obr. 1.1: Graf účinnostních tříd čtyřpólových motorů podle normy IEC 60034-30-1 [4]**

## 1.2 Princip magnetické reluktance

Synchronní reluktanční motor funguje na principu proměnného magnetického odporu, tedy magnetické reluktance. Základní myšlenka magnetického odporu je vysvětlena na obr. 1.2. Objekt „a“ má rozdílnou magnetickou reluktanci v ose d a ose q, zatímco objekt „b“ má stejnou reluktanci ve všech směrech.

Při aplikaci magnetického pole  $\psi$  vzniká moment  $M$ , když existuje úhlový rozdíl mezi osou d objektu a magnetickým polem, neboli když je zátěžný úhel  $\delta$  jiný než nulový. Z obrázku je patrné, že při natočení objektu „a“ vzniká narušení magnetického pole. Největší zkreslení pole se nachází na krajích objektu „a“, na opačných stranách vzhledem ke směru působení momentu. [5]



Obr. 1.2: Princip magnetické reluktance [5]

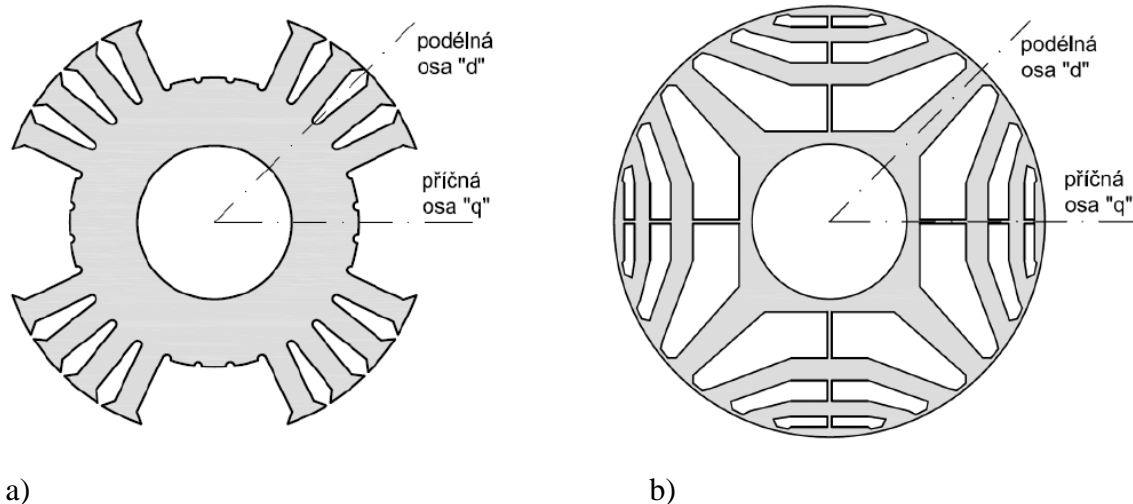
Zachováním konstantního zátěžného úhlu dochází k neustálé produkci momentu, protože systém se snaží dostat do stavu s nejmenší potenciální energií, tedy do stavu s nejmenším magnetickým odporem. Ve stroji dochází k neustálé přeměně elektromagnetické energie na mechanickou energii. Vinutí statoru produkuje točivé magnetické pole, na jehož základě vzniká moment, který neustále pohybuje s rotorem stroje.

S vývojem polovodičových prvků a na nich postavených frekvenčních měničů v druhé polovině 20. století došlo k renesanci myšlenky o použití synchronního reluktančního stroje, jehož princip byl znám už mnohem déle. Aplikace měniče však často

zvedá cenu i rozměry pohonu a není vždy žádaná. Některé způsoby použití (například čerpadla nebo klimatizace) nevyžadují otáčkovou regulaci, a proto by nebylo uplatnění měniče ekonomické. Podle [6] při DOL aplikaci (přímo spouštěné ze sítě, angl. direct online application), tedy napájení motoru ze sítě o stále frekvenci, je potřeba umístit na rotor klec nakrátko, aby došlo k rozběhu stroje, jako u všech synchronních strojů.

### 1.3 Rotor synchronního reluktančního stroje

Rotor synchronního reluktančního stroje se liší od klasického rotoru asynchronního stroje s kotvou nakrátko výraznou směrovou asymetrií. Z principu fungování tohoto typu stroje je jasné, že pro vytvoření rozdílné magnetické vodivosti po obvodu rotoru musí dojít k určitým změnám v geometrii rotoru. Podle [7] se historicky se k vytvoření rotoru přistupovalo dvěma způsoby: Vytvořením vyniklých pólů odstraněním několika rotorových zubů periodicky po obvodu rotoru - obr. 1.3. a) - nebo realizací bariér magnetického toku (angl. magnetic flux barriers) na rotoru - obr. 1.3. b).



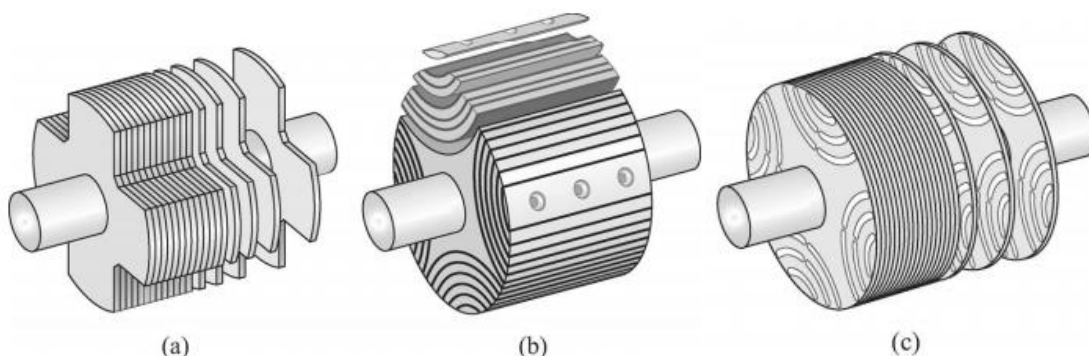
**Obr. 1.3: Základní typy provedení rotorů synchronních reluktančních strojů**  
**a) vytvoření vyniklých pólů odstraněním několika rotorových zubů b) realizace bariér magnetického toku [7]**

Postupným vývojem a testováním se došlo k závěru, že rotor s magnetickými bariérami vykazuje mnohem lepší parametry, a proto se další výzkum ubírá tímto směrem. Principiálně lze rotor s magnetickými bariérami vyrobit dvěma způsoby:

- Axiálně laminovaný rotor (angl. Axially laminated anisotropic - ALA rotor), Obr. 1.4. (b)

- Příčně laminovaný rotor (angl. Transversally laminated anisotropic - TLA rotor), Obr. 1.4. (c)

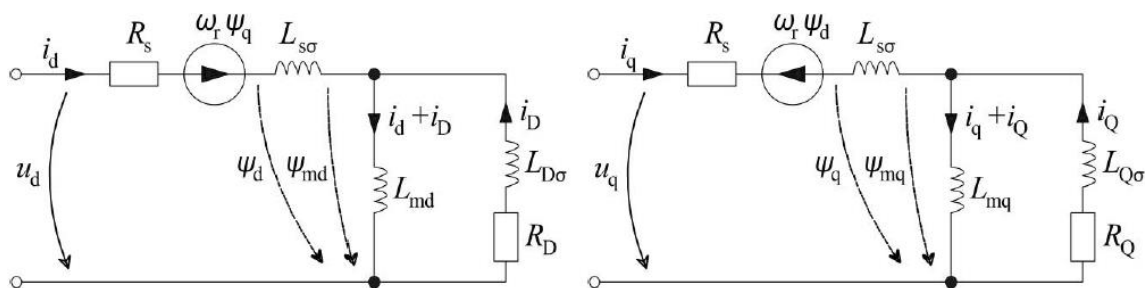
U axiálně laminovaného rotoru jsou jednotlivé vrstvy oceli tvarovány a nanášeny na každý pól zvlášť a navzájem od sebe izolovány pomocí bariér ze vzduchu, mědi nebo hliníku. Pro zachování mechanické pevnosti rotoru musí být jednotlivé bariéry spojené pólovými drážky v centrální oblasti každého pólu rotoru. U příčně laminovaného rotoru jsou k sobě plechy lisovány klasickým způsobem jako u výroby asynchronních strojů.



**Obr. 1.4: Druhy postupů při výrobě rotoru synchronních reluktančních strojů**  
a) rotor s vyniklými póly b) axiálně laminovaný rotor c) příčně laminovaný rotor [8]

## 1.4 Synchronní reluktanční motor s klecí nakrátko

Při motorových aplikacích s dlouhou dobou konstantních otáček přináší použití frekvenčního měniče nadbytečné výdaje v podobě materiálu i finančních prostředků. Synchronní reluktanční stroj potřebuje ke svému rozběhu z nulových otáček frekvenční měnič. Jelikož se tato práce zabývá použitím synchronního reluktančního stroje při přímém připojení na síť bez frekvenčního měniče, musí být rotor stroje opatřen klecí nakrátko. Náhradní schéma SynRM s klecí nakrátko v d-q souřadnicích je zobrazeno na obr. 1.5.



**Obr. 1.5: Náhradní schéma SynRM s klecí nakrátko v d-q souřadnicích [9]**

Napěťové rovnice korespondující se schématem na obr. 1.5 jsou zapsány takto:

$$u_d = R_s \cdot i_d + \frac{d\psi_d}{dt} - \omega_r \cdot \psi_q \quad (1.1)$$

$$u_q = R_s \cdot i_q + \frac{d\psi_q}{dt} + \omega_r \cdot \psi_d \quad (1.2)$$

Podle [9] lze spřažené magnetické toky v jednotlivých souřadnicích vyjádřit pomocí těchto rovnic:

$$\psi_d = L_d \cdot i_d = (L_{md} + L_{s\sigma}) \cdot i_d + L_{md} \cdot i_D \quad (1.3)$$

$$\psi_q = L_q \cdot i_q = (L_{mq} + L_{s\sigma}) \cdot i_q + L_{mq} \cdot i_Q \quad (1.4)$$

## 1.5 Moment a výkon synchronního reluktančního motoru

Vztahy pro výpočet momentu a výkonu synchronního reluktančního motoru v závislosti na proudech v d-q souřadnicích jsou vypsány na následujících řádcích:

$$M = \frac{3}{2} \cdot p \cdot (\psi_q i_q - \psi_d i_d) \quad (1.5)$$

$$P = M \cdot \omega_s = \frac{3}{2} \cdot p \cdot \omega_s \cdot (\psi_q i_q - \psi_d i_d) \quad (1.6)$$

Podle [9] jsou moment a výkon v závislosti na zátěžném úhlu vyjádřeny v těchto rovnicích:

$$\begin{aligned} M &= \frac{3}{4} \cdot p \cdot \psi_s^2 \cdot \left( \frac{L_d - L_q}{L_d L_q} \right) \cdot \sin 2\delta \\ &= \frac{3}{4} \cdot p \cdot \psi_s^2 \cdot \left( \frac{\frac{L_d}{L_q} - 1}{L_d} \right) \cdot \sin 2\delta \end{aligned} \quad (1.7)$$

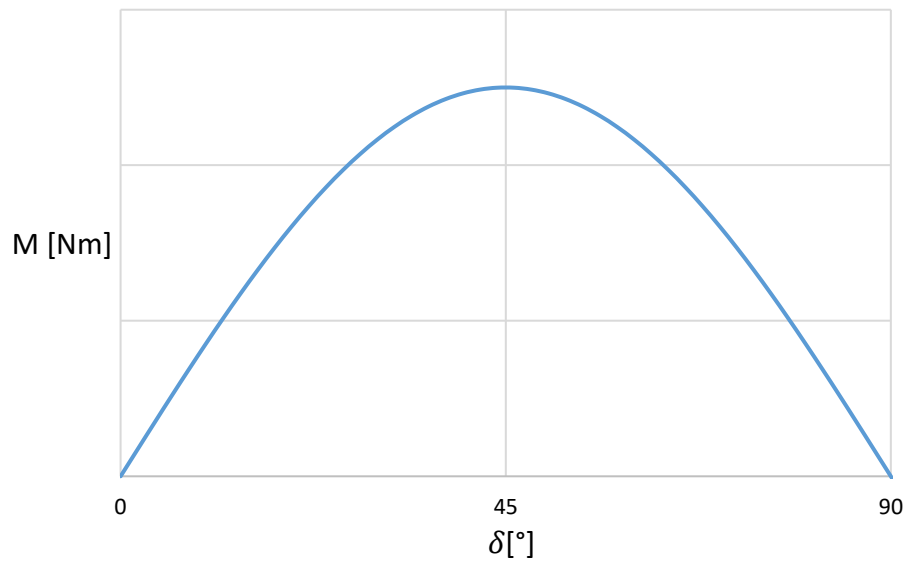
$$P = M_e \cdot \omega_s = \frac{3}{4} \cdot p \cdot \omega_s \cdot \psi_s^2 \cdot \left( \frac{L_d - L_q}{L_d L_q} \right) \cdot \sin 2\delta \quad (1.8)$$

Pro synchronní provoz stroje platí následující rovnice:

$$\omega_s = \omega_r \quad (1.9)$$

Ze vztahu (1.7) vyplývá, že maximální moment bude produkovat motor při zátěžném úhlu  $\delta = \frac{\pi}{4} = 45^\circ$ , protože platí vzorec (1.10). Závislost momentu na zátěžném úhlu lze pozorovat na obr. 1.6.

$$\max(\sin 2\delta) = \sin(2 \cdot 45^\circ) = \sin(90^\circ) = 1 \quad (1.10)$$



**Obr. 1.6: Závislost momentu na zátěžném úhlu**

## 1.6 Poměr indukčností v ose d a q

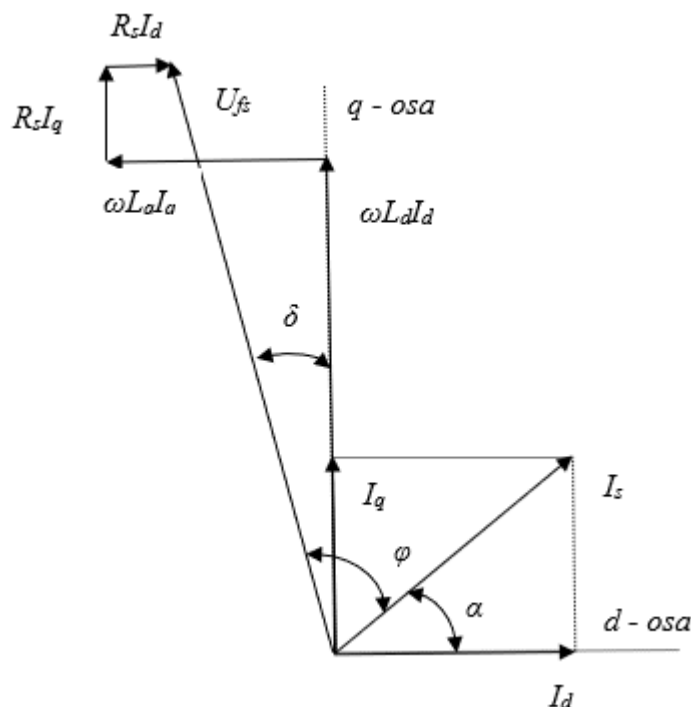
Poměr indukčností v ose d a q je velmi důležitým parametrem synchronních reluktančních motorů. Z rovnice (1.7) vyplývá, že největší moment bude produkován při maximálním rozdílu  $L_d - L_q$ , a tím pádem by poměr  $L_d/L_q$  měl být co nejvyšší. Snahou konstruktérů je tedy vytvořit vysokou hodnotu  $L_d$  zajištěním kvalitní vodivé cesty pro magnetický tok v ose d a nízkou hodnotu  $L_q$  vytvořením bariér magnetického toku v ose q. Kostko [10] už v roce 1923 vypočítal hodnotu poměru indukčností na 25,6 při zkoumání tehdejšího stroje. Podle dnešních měření se nejvyšší prakticky dosažitelná hodnota však pohybuje pouze okolo 10 u motorů s příčně laminovaným rotorem (TLA).

Na poměru indukčností v d a q ose závisí také účinník motoru. Maximální účinník motoru lze vypočítat pomocí následující rovnice:

$$\cos\varphi_{max} = \frac{\frac{L_d}{L_q} - 1}{\frac{L_d}{L_q} + 1} \quad (1.11)$$

## 1.7 Fázorový diagram při zatížení synchronního reluktančního motoru

Při zkoumání SRM připojeného na síť v ustáleném stavu je možno zkonstruovat fázorový diagram.



Obr. 1.7: Fázorový diagram SynRM [10]

Podle fázorového diagramu na obr. 1.7 platí pro výpočet proudů v d a q ose následující rovnice:

$$I_d = I_s \cdot \cos \alpha \quad (1.12)$$

$$I_q = I_s \cdot \sin \alpha \quad (1.13)$$

$$\alpha = 90^\circ + \delta - \varphi \quad (1.14)$$

## 1.8 Výpočet reaktancí v ose d a q z měření naprázdno a z fázorového diagramu při zatížení

Při měření naprázdno je statorové vinutí napájeno jmenovitým napětím  $U_{0f}$  s jmenovitou frekvencí  $f_n$ . Stroj odebírá proud naprázdno  $I_0$  a pracuje s účínkem naprázdno  $\cos \varphi_0$ . Podle [10] lze indukčnost v ose d potom vypočítat podle vztahu:

$$L_d = \frac{U_{0f}}{\omega \cdot I_0} \cdot \sin \varphi_0 \quad (1.15)$$



Z fázorového diagramu SynRM na obr. 1.7 vyplývá vztah pro výpočet indukčnosti v ose q:

$$L_q = \frac{U_{fs} \sin \beta + R_s I_d}{\omega I_q} \quad (1.16)$$

## 1.9 Aktuální přehled komerčně dostupných synchronních reluktančních strojů

V nynější době nabízí většina firem synchronní reluktanční stroje jako balíček včetně frekvenčního měniče. Při pohledu do katalogu společností ABB je možno zjistit, že nabízí čtyřpólové provedení stroje ve výkonových řadách od 5,5 do 200 kW s účinností při jmenovitých otáčkách od 88,9 do 94,1 %. Jmenovitý moment se pohybuje v rozmezích od 17,5 do 1910 Nm. Minimální přetížitelnost stroje při nominálních otáčkách je 1,5, maximální pak 1,9. Podle [11] ABB uvádí jako hlavní výhodu použitelnost jejich balíčku u aplikací s volitelnými otáčkami, například dopravních pásů. Vývoj synchronních reluktančních strojů je velmi dlouhá a nákladná činnost. Při prodeji pohonu včetně frekvenčního měniče získá firma vyšší zisk z každého prodaného kusu, a proto dává prodej celého balíčku i s měničem větší ekonomický smysl.

Synchronní reluktanční stroje spouštěné ze sítě nejsou zatím komerčně dostupné, ale ABB si uvědomuje jejich použitelnost při aplikacích s fixními otáčkami, a proto věnuje i této oblasti část vývoje [12]. Jedním z testovaných prototypů je motor s následujícími parametry:

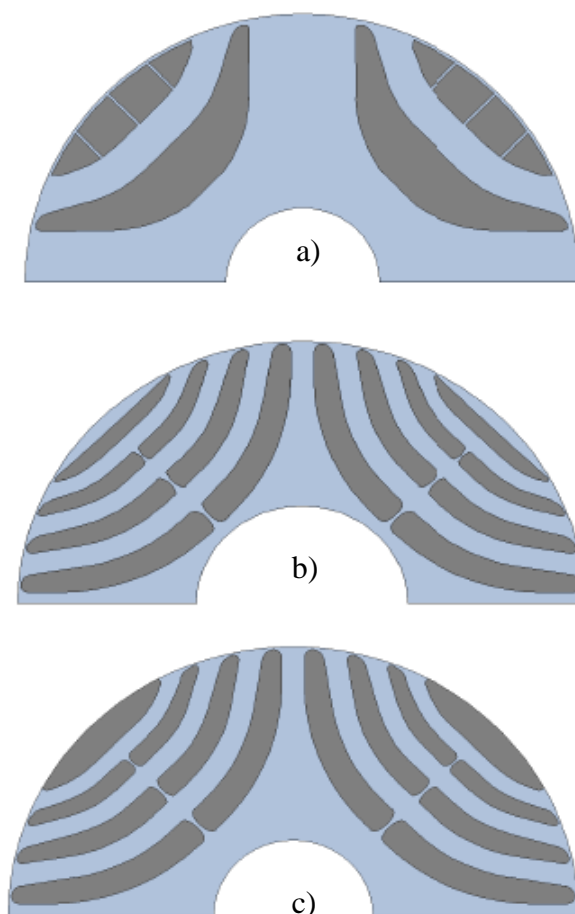
**Tab. 1.2: Parametry prototypu SynRM ABB [12]**

Výkon [kW]	1,5
Velikost rámu [mm]	90
Frekvence [Hz]	50
otáčky [ot./min]	1500
Napětí [V]	400
Jmenovitý proud [A]	3,84
Účinnost [%]	88,2

Podle [12] tento motor při porovnání s indukčním motorem účinnostní třídy IE3 při nominálním zatížení vykazuje asi o 3% lepší účinnost.

## 1.10 Vědecký výzkum v oblasti synchronních reluktančních strojů

O synchronních reluktančních strojích spouštěných ze sítě vzniká i řada vědeckých studií. V publikaci [13] jsou srovnány tři druhy rotorů SynRM pomocí analýzy konečných prvků. Všechny zkoumané možnosti pracují s rotorem s bariérami toku zalitými hliníkem. Jednotlivé varianty jsou v [13] označeny pomocí písmen LS, což znamená „Line Start“ tedy spouštěné ze sítě. Tento výzkum počítá s aplikací podobných strojů do čerpadel a pump.



**Obr. 1.8: Zkoumané varianty rotoru SynRM s hliníkovou klecí: a) Rotor se dvěma bariérami, b) Rotor se čtyřmi bariérami, c) Rotor se čtyřmi bariérami a menšími úpravami [13]**

Po provedení konečně-prvkové analýzy byly v práci [13] zjištěny následující výsledky a srovnány s parametry klasického indukčního motoru (IM):

**Tab. 1.3: Parametry SynRM s různými rotory a rotor indukčního motoru [13]**

	a)	b)	c)	IM
Napájecí napětí (V)	398	398	398	398
Fázový proud (A)	5,8	4,79	4,95	5,0
Jmenovitý moment (Nm)	14,2	14,2	14,2	15,1
Jmenovité otáčky (ot./min)	1500	1500	1500	1381
Výkon (W)	2231	2231	2231	2183
Jmenovitý účinník (-)	0,718	0,763	0,745	0,794
Jouleovy ztráty ve statoru (W)	439	299	318	330
Jouleovy ztráty v rotoru (W)	121	31	48	168
Účinnost (%)	77,3	84,5	83,4	79,0

Indukční motor při tomto zkoumání pracuje se skluzem 7,9 %. Při porovnání parametrů různých synchronních reluktančních motorů je jasně vidět jejich největší výhoda. Jouleovy ztráty v rotoru jsou u variant b) a c) asi čtyřikrát nižší než u standardního indukčního motoru. Snížené ztráty se musí projevit v účinnosti, a proto mají stroje b) a c) o 4,5 % a 3,4 % lepší účinnost.

Autoři v publikaci [13] diskutují o důležitých veličinách, jmenovitě o momentu rozběhovém a momentu vytahujícím motor ze synchronismu (angl. „pull-up“ respektive „pull-out torque“). Při rozběhu SynRM se motor, než skočí do synchronismu, nejdříve chová jako asynchronní. Během roztáčení z nulových otáček působí právě rozbíhající moment. Maximální zátěžný moment je maximální moment, kterým je možno motor zatížit, aniž by vypadl ze synchronismu. Tento moment je obvykle mnohem vyšší než jmenovitá hodnota. Vysoký poměr maximálního zátěžného momentu a momentu jmenovitého znamená, že motor má vysoký účinník při synchronních otáčkách.

Další důležitou veličinou je moment vtahující motor do synchronismu (angl. „pull-in torque“), neboli maximální zátěžný moment, kterým je možno motor zatížit, aby se dostal z asynchronního do synchronního stavu provozu. Tato veličina slouží jako měřítko

synchronizace motoru a je inverzně závislá na setrvačnosti celého systému. Při návrhu synchronního stroje spouštěného ze sítě je snaha o tvorbu vysoké účinnosti a účinníku, ale zároveň i o vysoký maximální zátěžný moment, aby se motor zvládl rozběhnout se širokou škálou břemen.

Podle [13] se při návrhu SynRM uvažují dvě hlavní hlediska:

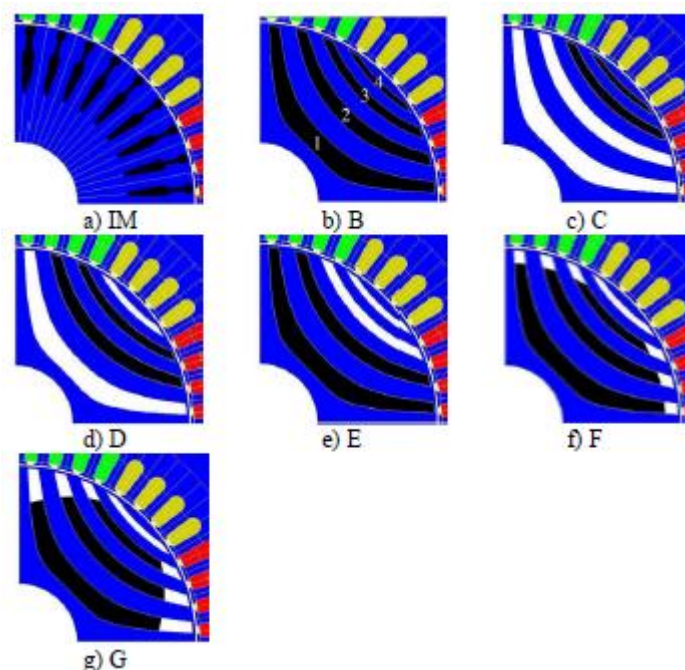
Provoz při synchronních otáčkách – Snaha o vysokou účinnost, účinník, moment vytahující moment ze synchronismu a poměr indukčností v ose d a q.

Minimalizace rotorového odporu v ose d i q pro maximalizaci momentu vtahujícího motor do synchronismu.

Z výzkumu [13] vyplývá, že snížení rotorového odporu na polovinu se projeví zvýšením rozběhového momentu, což má za následek strmější momentovou charakteristiku v blízkosti synchronních otáček a zvýšení maximálního zátěžného momentu. Nevýhodou snížení rotorového odporu je snížení brzdného momentu.

Varianta rotoru c) na obr. 1.8 byla navržena pro zvýšení vtahujícího momentu. Oproti klasickému rozložení bariér magnetického toku, jako u rotoru b) na obr. 1.8, je odebrána vrstva oceli u vnější oblasti magnetického pólu rotoru, a naopak je zvýšena plocha vyplněná hliníkem pro snížení rotorového odporu.

Článek [14] se zabývá nejlepším možným tvarem bariér magnetického toku zalitého hliníkem. Cílem je najít rotorovou klec s nízkými Jouleovými ztrátami v rotoru a získat tak skvělé parametry při synchronních otáčkách, aniž by byla výrazně ovlivněna startovací schopnost motoru. Simulace byla provedena na 30 kW čtyřpólovém SynRM pomocí metody konečných prvků.



**Obr. 1.9: Zkoumané varianty rotoru SynRM v článku [14]**

Výsledky zkoumání rozběhu strojů je možno porovnat v následující tabulce:

**Tab. 1.4: Doba nárůstu a ustálení při rozběhu různých druhů rotoru SynRM [14]**

Typ rotoru	Doba nárůstu $t_r$ [s]	Doba ustálení $t_s$ [s]
IM	0,45	0,45
B	0,24	0,48
C	0,45	1,43
D	0,55	1,01
E	-	-
F	0,72	1,13
G	1,74	2,27

Doba ustálení se stanovila, když kmitání otáček spadlo pod hranici 1% ustálené hodnoty otáček. Z doby nárůstu a ustálení je patrné, že vodivost hliníku v bariérách 2,3,4 na obr. 1.9 b) má mnohem větší vliv na startovací schopnost stroje než bariéra 1. Rotor E, který neměl bariéry 3 a 4 vůbec vyplněny hliníkem, se dokonce ani nerozběhl. Experimentální tvary hliníkových klecí na obr. 1.9 f) a g) mají okrajové části bariér bez hliníku z důvodu snížení Jouleových ztrát v rotoru. Startovací schopnost těchto rotorů je

v porovnání s ostatními zkoumanými možnostmi horší, protože doba nárůstu i ustálení je delší.

V další části studie [14] jsou rotory z Obr 1.9 analyzovány při jmenovitých otáčkách a momentu. Rotor D má skoro o 60% menší Jouleovy ztráty v rotoru, respektive o 47% menší než rotor C. Ztráty v rotoru F, při zmenšení plochy zaplněné hliníkem, jsou ještě mnohem menší, o 50 % oproti typu D a o 80 % oproti rotoru B. Rotor F by bylo velice komplikované vyrobit, ale z výzkumného hlediska je zajímavé, o kolik jsou jeho ztráty nižší.

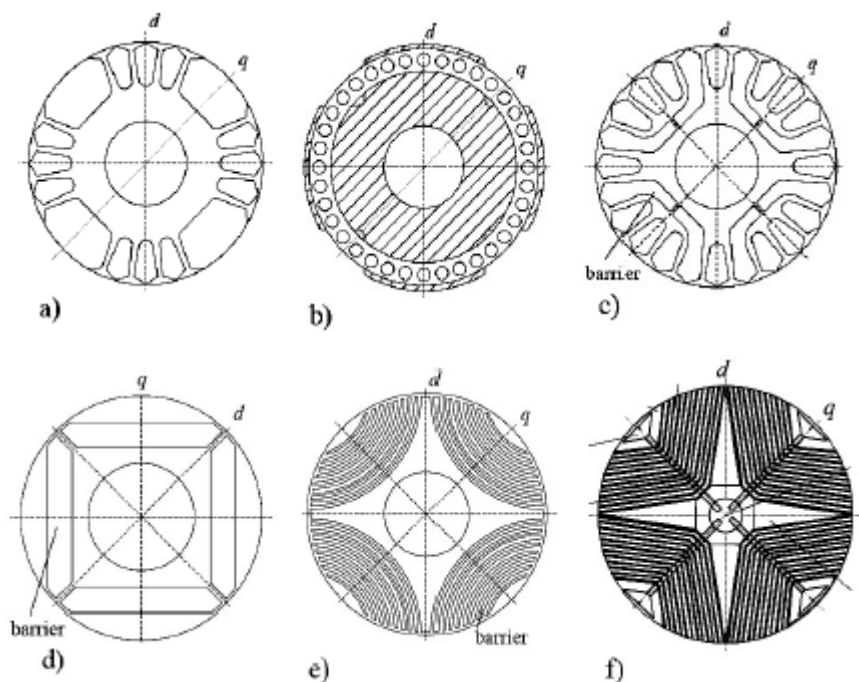
**Tab. 1.5: Data ztrát a účinností při jmenovitých otáčkách různých druhů rotorů ze studie [14]**

Parametr	IM	B	C	D	F	G
Jmenovitý moment [Nm]	194	191	191	191	191	191
Jmenovité otáčky [ot./min]	1468	1500	1500	1500	1500	1500
Fázový proud [A]	31,1	32	32,01	31,97	31,96	31,95
Celkové ztráty v železe [W]	442,1	422	425,3	433,5	431	431
Jouleovy ztráty ve statoru [W]	981,2	1038,5	1039,2	1036,2	1035,9	1035,6
Jouleovy ztráty v rotoru [W]	388,8	68,2	59,3	27,7	14,2	11,9
Celkové ztráty [W]	1812,1	1528,7	1523,7	1497,4	1481,1	1478,5
Rozdíl ve ztrátách [W]	0	-283,4	-288,4	-314,7	-331	-333,6
Účinnost [%]	94,3	95,15	95,17	95,25	95,3	95,3

## 2 NÁVRH ROTORU SYNCHRONNÍHO RELUKTANČNÍHO STROJE SPOUŠTĚNÉHO ZE SÍTĚ

### 2.1 Výběr druhu rotoru

V kap. 1.3 této práce bylo zmíněno, že historický vývoj rotoru synchronních reluktančních strojů se uchýlil směrem rotorů s bariérami magnetického toku.

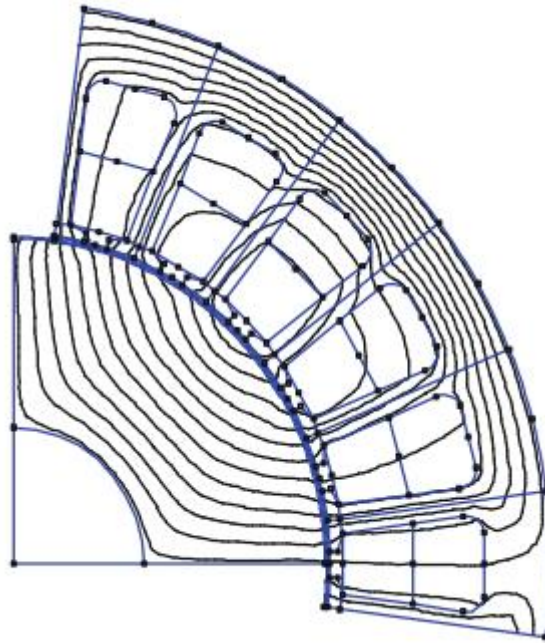


**Obr. 2.1: Historický vývoj rotorů synchronních reluktančních strojů [5]**

Rotory a) a b) na obr. 2.1 jsou rotory s tzv. vyjádřenými póly, varianty c) a d) mají pouze jedinou bariéru toku, možnosti e) a f) jsou rotory s vícenásobnými bariérami.

Nejčastěji používaná metoda k vytvoření magnetických bariér na rotoru je inspirována přirozeným tvarem magnetických siločar v plném rotoru. Magnetické bariéry se snaží co nejvíce přiblížit tvaru magnetických siločar, tak aby nedošlo k omezení přechodu magnetického toku do rotoru. Z tohoto důvodu je ideální rotor s kulatými bariérami magnetického toku, který bude nadále v této práci použit. Tento typ rotoru je zobrazen na obr. 2.1 e).

## 2.2 Matematický popis rotoru



**Obr. 2.2: Magnetické siločáry v plném rotoru [15]**

Metoda vyvinutá pro popis geometrie respektující magnetické cesty siločar, která se podobá cestě tekutiny („Fluid“), se jmenuje podle tohoto slova v originále „Fluid Shaped Rotor Geometry“. Základní popis je zformován ve dvourozměrné rovině, jejíž rozměry jsou dány úhlem  $\pi/p$  a vnitřní hranici  $a$ , která značí poloměr nemagnetické hřídele. Podle [15] jsou v polárních souřadnicích všechny body pole magnetických siločar popsány následující rovnicí:

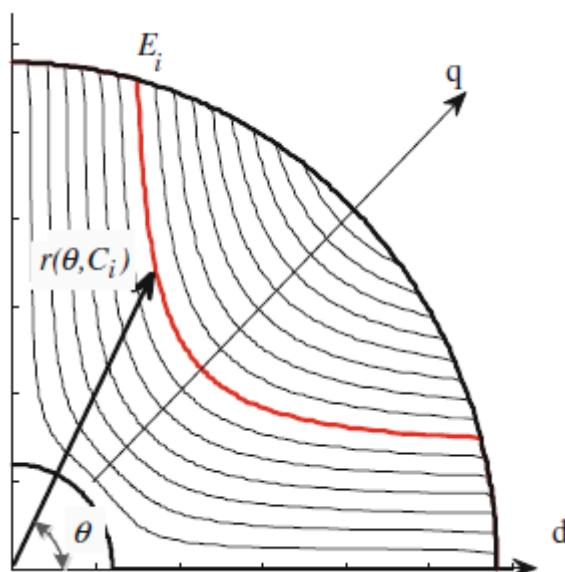
$$r(\theta, C) = a \cdot \sqrt[p]{\frac{C + \sqrt{C^2 + 4\sin^2(p\vartheta)}}{2\sin(p\vartheta)}} \quad (2.1)$$

Dále platí i rovnice:

$$0 \leq \vartheta \leq \frac{\pi}{p} \quad (2.2)$$

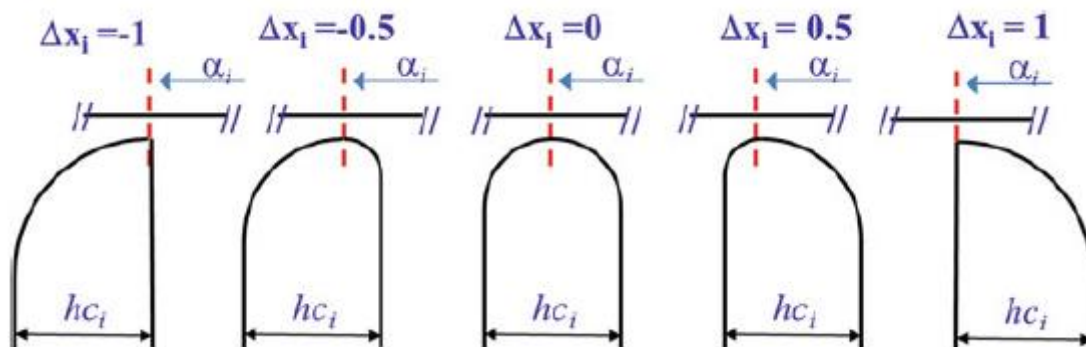
$$C = \sin(p\theta) \cdot \frac{\left(\frac{r}{a}\right)^{2p} - 1}{\left(\frac{r}{a}\right)^p} \quad (2.3)$$



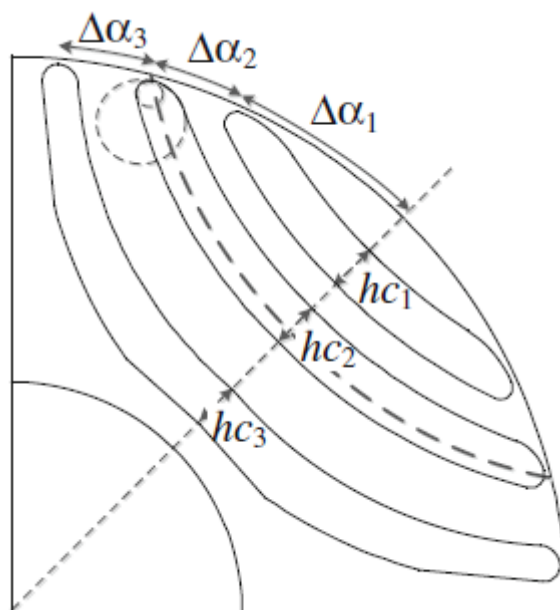


**Obr. 2.3: Určení siločáry podle polárních souřadnic [15]**

Při výběru libovolné siločáry lze vypočítat podle předem stanovených rovnic každý její bod. Pro přehlednost se průnik siločáry a vnějšího obvodu rotoru značí bodem  $E_i$ . Podle [14] je každá vzduchová bariéra dána třemi parametry. Prvním je vzdálenost  $\Delta\alpha_i$  od osy roviny na vnějším obvodu rotoru. Druhým je tloušťka bariéry  $hc_i$ . A třetím je parametr „zakulacení“ bariéry  $\Delta x_i$ . Poslední složka popisu bariéry leží v intervalu  $-1;1$ , kde  $\Delta x_i = -1$  ( $\Delta x_i = 1$ ) znamená, že křivka bariéry s bodem  $E_i$  leží na vnější hranici bariéry a na jejím konci se v limitě nachází pravý úhel. Při  $\Delta x_i = 0$  leží křivka bariéry přesně uprostřed a konec bariéry má tvar polokružnice. Nejčastěji se parametr  $\Delta x_i$  volí v okolí hodnoty 0,5 (-0,5), kdy leží křivka bariéry asi ve čtvrtině její tloušťky a konec bariéry je tvořen dvěma částmi kružnic s různými poloměry.



**Obr. 2.4: Volba různých hodnot parametru bariéry  $\Delta x_i$  [15]**



**Obr. 2.5: Příklad geometrie se zobrazenými parametry bariér magnetického toku [15]**

## 2.3 Referenční rotor SynRM

Jako základní model rotoru je vybrán typ s kulatými bariérami toku respektující přirozenou cestu toku v plném rotoru. Počet bariér u referenčního modelu je stanoven na tři. Tyto bariéry jsou podle trendu ve výzkumu zality hliníkem v celém svém objemu pro zajištění startovací schopnosti motoru. Rozměry referenčního rotoru jsou následující:

**Tab. 2.1: Rozměry referenčního rotoru SynRM**

Vnější průměr [mm]	83
Vnitřní průměr [mm]	30
Rozměry bariér [mm]	3; 5; 6
Rozměry rotoru mezi bariérami [mm]	2; 4; 4; 2
Vzdálenost kraje bariér od vnějšího okraje rotoru [mm]	0,5



**Obr. 2.6: Referenční model rotoru SynRM**

## **2.4 Tvorba geometrie rotoru SynRM**

Cílem této části práce je vytvoření parametrického modelu rotoru synchronního reluktančního stroje, který umožní zkoumat různé geometrie. Spoluprací programů Matlab a ANSYS Maxwell lze vytvořit projekt, který využije lepších aspektů obou těchto softwarů. ANSYS Maxwell umožňuje velmi podrobnou simulaci elektromagnetických polí všech elektrických strojů. Při zkoumání podobného stroje o jiných rozměrech či parametrech je však nutné celý stroj v programu sestavit znovu. Vytvořením parametrického modelu odpadá zbytečná práce při opětovné konstrukci. Po nahrání nových rozměrů do parametrického modelu lze ihned nový stroj simulovat a dále s ním pracovat. Postprocessing a další zpracování výsledků je také jednodušší pomocí programu Matlab, protože umožňuje širší možnosti přizpůsobení a zobrazení výsledků.

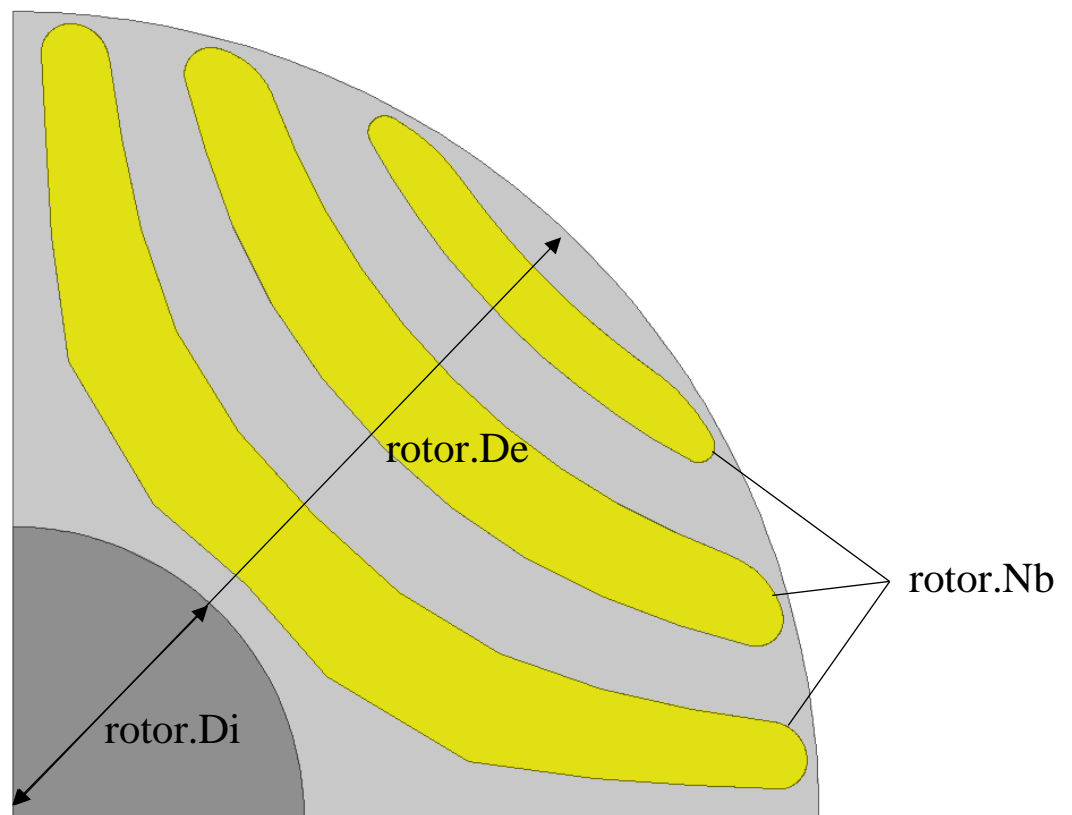
V této práci nebyl vytvořen celý použitý skript. Bylo navázáno na práci Giacomu Baccy [16] z univerzity v Padově, který použil své matematické znalosti a napsal skript pro výpočet geometrie rotoru, kterým podpořil rychlejší výzkum v této oblasti.

## 2.4.1 Nahrání základních dat rotoru

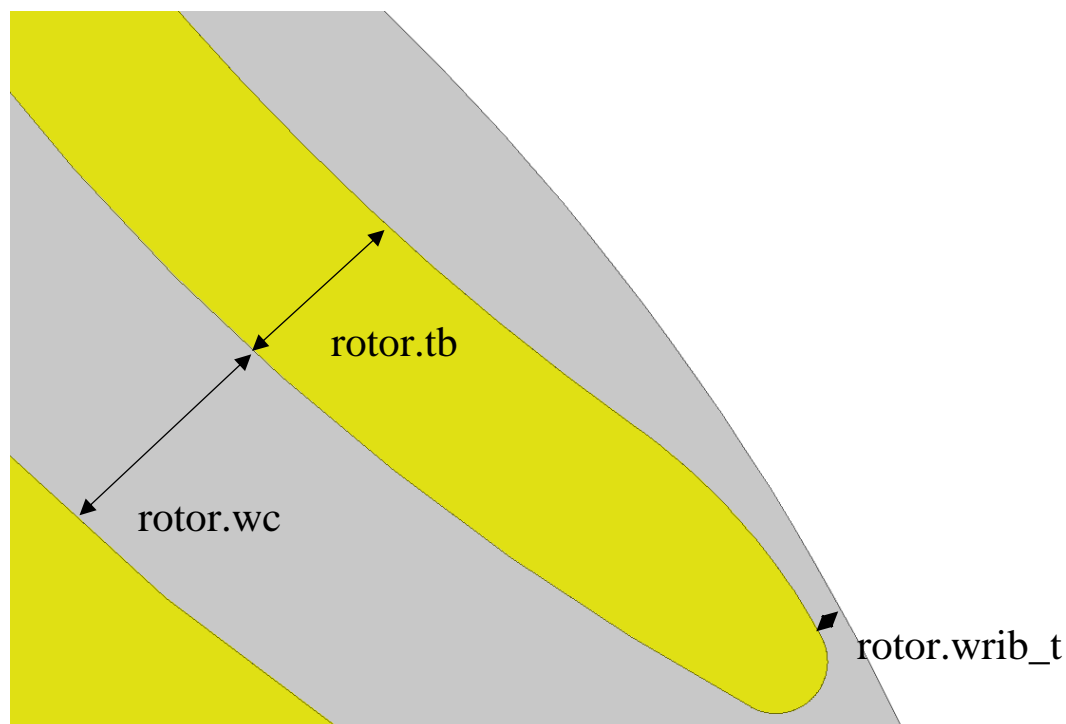
Pro výpočet bariér magnetického toku je nutno specifikovat počet bariér a jejich parametry:

```
rotor.p = 2;  
mm = 1e-3;  
rotor.De = 83*mm; % [m]  
rotor.Di = 80*mm; % [m]  
rotor.Nb = 3;  
rotor.tb = [2 5 6]*mm; % [m]  
rotor.wc = [2 4 4 2]*mm; % [m]  
rotor.Nstep = [5, 5, 5];  
rotor.wrib_t = 0.5*mm; % [m],
```

, kde rotor.p znamená počet pólpárů stroje, rotor.De vnější průměr rotoru, rotor.Di vnitřní průměr rotoru, rotor.Nb počet bariér magnetického toku, rotor.tb rozměry bariér, rotor.wc rozměry rotoru mezi bariérami, rotor.Nstep počet kroků k vykreslení hranice bariér a rotor.wrib\_t vzdálenost mezi koncem bariéry toku a vnějším průměrem rotoru. Na obr. 2.7 a 2.8 jsou pro větší přehlednost zobrazeny parametry rotoru na jeho geometrii.



**Obr. 2.7: Parametry rotoru SynRM**



**Obr. 2.8: Parametry bariér magnetického toku**

Pomocí přebírané funkce `barrier = calc_fluid_barrier(rotor)` se vypočítají všechna potřebná data a nahrají do proměnné `barrier`.

## 2.4.2 Navázání propojení Ansys Maxwell a Matlab

Hlavička skriptu v programu Matlab musí obsahovat příkaz pro spojení s aplikací Ansys Maxwell.

```
iMaxwell=actxserver('AnsoftMaxwell.MaxwellScriptInterface');
Desktop=iMaxwell.GetAppDesktop();
Desktop.RestoreWindow;
```

Následuje specifikace určitého projektu, designu a editoru, aby Matlab věděl, s kterým souborem má komunikovat.

```
Project = Desktop.SetActiveProject('SynRM');
Design = Project.SetActiveDesign('Maxwell2DDesign1');
Editor = Design.SetActiveEditor('3D Modeler');
DefinitionManager = Project.GetDefinitionManager();
```

Stejnou hlavičku i určení projektu je nutno opakovat u všech funkcí, které se volají v rámci hlavního programu.

### 2.4.3 Rozdíly v kódu Ansys Maxwell a Matlab

Při vytváření geometrie rotoru v interaktivním prostředí Ansys Maxwell lze použít funkci pro nahrávání skriptu do souboru. Tento příkaz se nachází pod záložkou „Tools - Record Script to File ...“. Jednoduché zkopírování nahraného skriptu však Matlab nepřebere z důvodu použití jiné skriptovací syntaxe. V nahraném textu je vždy nutno provést pár změn, pro použití v programu Matlab. Stále opakující případy změn ve skriptu jsou následující:

<i>oEditor.DuplicateMirror</i>	→	<i>invoke(Editor,'DuplicateMirror')</i>
<i>Array(</i>	→	<i>{</i>
<i>"</i>	→	<i>'</i>

### 2.4.4 Nahrání proměnných do Ansys Maxwell

K načtení všech potřebných proměnných je použita funkce `maxwell_create_variables(barrier,rotor);`, která je poté volána v rámci hlavního skriptu.

Nejprve jsou nahrány do Maxwellu rozměry rotoru pomocí příkazu „ChangeProperty“. Dále je nutné použít příkaz „num2str“ pro přehrání hodnot z číselného datového typu do řetězce a spojení s předem nahranou proměnnou „mm“ pro označení milimetrů v Maxwellu.

```
invoke(Design, 'ChangeProperty', {'NAME:AllTabs', {'NAME:LocalVariableTab',  
{'NAME:PropServers','LocalVariables'}, {'NAME:NewProps',...  
{'NAME:Dri','PropType:=' , 'VariableProp', 'UserDef:=' , true, 'Value:=' ,  
{[num2str(rotor.Di*1000) 'mm']}}},...  
{'NAME:Dre','PropType:=' , 'VariableProp', 'UserDef:=' , true, 'Value:=' ,  
{[num2str(rotor.De*1000) 'mm']}}},...  
}});
```

Jako další je nutné nahrát body pro sestrojení bariér magnetického toku. Tento proces je uskutečněn pomocí dvou do sebe zanořených cyklů. První řeší určení samotné bariéry a druhý počet bodů na hranici bariéry. Index „bkk“ značí číslo bariéry a „i“ číslo bodu.

```
for bkk=1:rotor.Nb  
    for i=1:length(barrier(bkk).X)  
        invoke(Design, 'ChangeProperty', {'NAME:AllTabs', {'NAME:LocalVariableTab',  
{'NAME:PropServers','LocalVariables'}, {'NAME:NewProps',...  
{'NAME:X' num2str(bkk) '_' num2str(i)},'PropType:=' , 'VariableProp',  
'UserDef:=' , true, 'Value:=' , {[num2str(barrier(bkk).X(i)*1000) 'mm']}}},...
```

```

    {[ 'NAME:Y' num2str(bkk) '_' num2str(i)], 'PropType:=' , 'VariableProp',
    'UserDef:=' , true, 'Value:=' , {[num2str(barrier(bkk).Y(i)*1000) 'mm'] }},...
    ]});
end
end

```

Posledními proměnnými, které je nutné načíst do Maxwellu jsou úhly dvou oblouků, kterými jsou zakončeny bariéry magnetického toku.

```

for bkk=1:rotor.Nb
    a=sqrt((barrier(bkk).X(2)-barrier(bkk).X(1))^2+(barrier(bkk).Y(2)-
    barrier(bkk).Y(1))^2);
    b=sqrt((barrier(bkk).X(3)-barrier(bkk).X(2))^2+(barrier(bkk).Y(3)-
    barrier(bkk).Y(2))^2);
    c=sqrt((barrier(bkk).X(3)-barrier(bkk).X(1))^2+(barrier(bkk).Y(3)-
    barrier(bkk).Y(1))^2);
    angle = acos((a^2+b^2-c^2)/(2*a*b))*180/pi;

    invoke(Design, 'ChangeProperty', {'NAME:AllTabs', {'NAME:LocalVariableTab',
    {'NAME:PropServers', 'LocalVariables'}, {'NAME:NewProps',...
    {[ 'NAME:a_1_' num2str(bkk)], 'PropType:=' , 'VariableProp', 'UserDef:=' , true,
    'Value:=' , {[num2str(a)] }},...
    {[ 'NAME:b_1_' num2str(bkk)], 'PropType:=' , 'VariableProp', 'UserDef:=' , true,
    'Value:=' , {[num2str(b)] }},...
    {[ 'NAME:c_1_' num2str(bkk)], 'PropType:=' , 'VariableProp', 'UserDef:=' , true,
    'Value:=' , {[num2str(c)] }},...
    {[ 'NAME:angle_1_' num2str(bkk)], 'PropType:=' , 'VariableProp', 'UserDef:=' ,
    true, 'Value:=' , {[num2str(angle) 'deg'] } } }},...
    });
end

```

## 2.4.5 Postupné vytváření geometrie

K vykreslení geometrie je použita funkce `maxwell_draw_rotor(barrier,rotor);`, která je poté volána v hlavním programu.

Prvním krokem je zakreslení základních rozměrů rotoru. Toho se docílí vytvořením dvou kruhů pomocí příkazu „CreateCircle“ a jejich odečtením pomocí „Substract“. Kruh je definován souřadnicemi svého středu a poloměrem. Dále je možné specifikovat barvu, průhlednost a materiál rotoru.

```

invoke(Editor, 'CreateCircle', {'NAME:CircleParameters', 'IsCovered:=' , true,...
    'XCenter:=' , '0mm',...
    'YCenter:=' , '0mm',...
    'ZCenter:=' , '0mm',...

```

```

'Radius:=' 'Dre/2',...
'WhichAxis:=' 'Z', 'NumSegments:=' '0'},...
{'NAME:Attributes', 'Name:=' 'Dre', 'Flags:=' ',',...
'Color:=' '(105 105 105)', 'Transparency:=' 0,...
'PartCoordinateSystem:=' 'Global', 'UDMId:=' ',...
'MaterialName:=' 'vacuum' 'SolveInside:=' true});

```

```

invoke(Editor,'Subtract',{'NAME:Selections', 'Blank Parts:=' 'Dre', 'Tool Parts:=' 'Dri'}, {'NAME:SubtractParameters', 'KeepOriginals:=' false})

```

Další částí programu je vytvoření přímk, které tvoří základ geometrie bariér magnetického toku. První půlka bariér je vykreslena pomocí dvou zanořených cyklů a příkazu „CreatePolyline“. První cyklus řeší, o kterou bariéru se jedná a druhý o kterou přímku se jedná. Jednotlivé přímky jsou pojmenovány „Line“ spolu se dvěma indexy oddělenými podržítkem. První značí znovu bariéru a druhý pořadí vytvoření přímky.

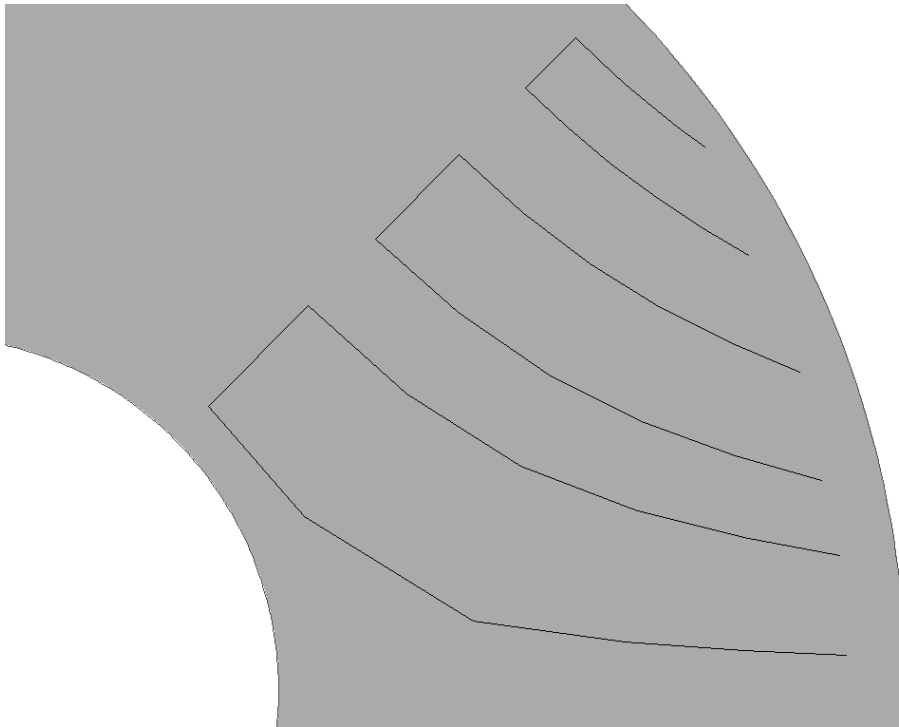
```

for bkk=1:rotor.Nb
    a=1;
    for i=3:(length(barrier(bkk).X)-3)
        invoke(Editor,'CreatePolyline',{'NAME:PolylineParameters',
        'IsPolylineCovered:=' true,...
        'IsPolylineClosed:=' false',{'NAME:PolylinePoints',...
        {'NAME:PLPoint',...
        'X:=',['X' num2str(bkk) '_' num2str(a+2)]},...
        'Y:=',['Y' num2str(bkk) '_' num2str(a+2)]},...
        'Z:=' '0mm'},...
        {'NAME:PLPoint',...
        'X:=',['X' num2str(bkk) '_' num2str(a+3)]},...
        'Y:=',['Y' num2str(bkk) '_' num2str(a+3)]},...
        'Z:=' '0mm'}},...
        {'NAME:PolylineSegments', {'NAME:PLSegment', 'SegmentType:=',...
        'Line', 'StartIndex:=' 0, 'NoOfPoints:=' 2}},...
        {'NAME:PolylineXSection', 'XSectionType:=',...
        'None', 'XSectionOrient:=' 'Auto', 'XSectionWidth:=' '0mm',
        'XSectionTopWidth:=',...
        '0mm', 'XSectionHeight:=' '0mm', 'XSectionNumSegments:=' '0',
        'XSectionBendType:=',...
        'Corner'}}}, {'NAME:Attributes', 'Name:=' ['Line' num2str(bkk) '_'
        num2str(a)], 'Flags:=' ',',...
        'Color:=' '(128 255 255)', 'Transparency:=' 0, 'PartCoordinateSystem:=',...
        'Global', 'UDMId:=' ', 'MaterialName:=' 'vacuum', 'SolveInside:=' true});
        a=a+1;
    end
end

```



*end*  
*end*



**Obr. 2.9: Přímky tvořící základ bariér magnetického toku**

Každá bariéra je zakončena kulatým tvarem z důvodu omezení ostrých hran, kde by mohly magnetické indukce dosahovat nežádoucích vysokých hodnot. V tomto místě je konec vytvořen ze dvou oblouků o různém středu i poloměru. Každý oblouk je definován středem, počátečním bodem a úhlem. Označení indexů je stejné jako v předchozích případech, první znamená bariéru a druhý pořadí bodu nebo oblouku. Střed prvního oblouku je druhý bod v každé bariéře a počáteční bod oblouku je druhý bod z každé bariéry.

Pro vytvoření každého oblouku na konci bariér magnetického toku je nutno nejprve vypočítat jeho úhel. Pro ideální funkci skriptu je nutné, aby výpočet stran trojúhelníku i úhlu oblouku probíhal přímo v program ANSYS Maxwell a ne v Matlabu.

Úhel je vypočítán pomocí Kosinovy věty (2.1) a jednotlivé rozměry trojúhelníku podle Pythagorovy věty. Úhel oblouku je ještě převeden z radiánů na stupně. První index u stran trojúhelníku a úhlu značí, o který ze dvou oblouků se jedná a druhý index značí

bariéru magnetického toku. Úhel oblouku je zadán se záporným znaménkem, protože se jedná o směr proti směru hodinových ručiček od počátečního bodu oblouku.

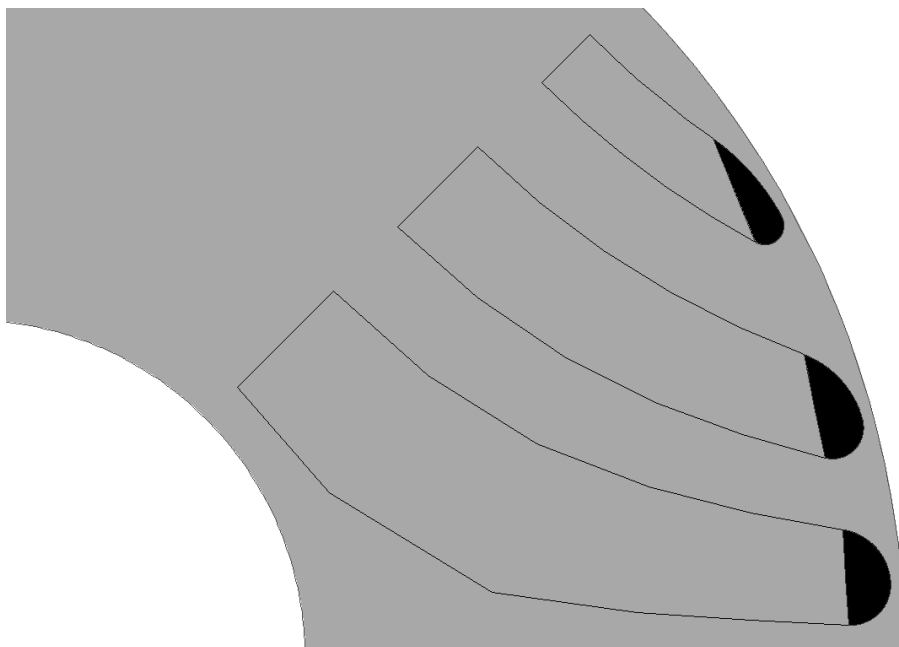
$$\gamma = \arccos\left(\frac{a^2 + b^2 - c^2}{2ab}\right) \cdot \frac{180}{\pi} \quad (2.4)$$

```
for bkk=1:rotor.Nb
    invoke(Editor,'CreatePolyline',                                {'NAME:PolylineParameters',
    'IsPolylineCovered:=' true, 'IsPolylineClosed:=',... _
    false, {'NAME:PolylinePoints', {'NAME:PLPoint',...
    'X:=' {[ 'X' num2str(bkk) ' ' _ ' num2str(3)]},...
    'Y:=' {[ 'Y' num2str(bkk) ' ' _ ' num2str(3)]},...
    'Z:=' '0mm'},...
    },...
    {'NAME:PolylineSegments',{'NAME:PLSegment',                    'SegmentType:='
    'AngularArc', 'StartIndex:=' 0, 'NoOfPoints:=' 1, 'NoOfSegments:=' '0',...
    'ArcAngle:=' {[ 'angle' num2str(bkk) ' ' _ '1*(-1)'] 'deg' },...
    'ArcCenterX:=' {[ 'X' num2str(bkk) ' ' _ ' num2str(2)]},...
    'ArcCenterY:=' {[ 'Y' num2str(bkk) ' ' _ ' num2str(2)]},...
    'ArcCenterZ:=' '0mm',...
    'ArcPlane:=' 'XY'}}, {'NAME:PolylineXSection', 'XSectionType:=' 'None',
    'XSectionOrient:=',... _
    'Auto', 'XSectionWidth:=' '0mm', 'XSectionTopWidth:=' '0mm',
    'XSectionHeight:=',... _
    '0mm', 'XSectionNumSegments:=' '0', 'XSectionBendType:=' 'Corner'}},
    {'NAME:Attributes', 'Name:=',... _
    ['Arc' num2str(bkk) ' ' _ ' num2str(1)], 'Flags:=' ' ', 'Color:=' '(128 255 255)',
    'Transparency:=' 0, 'PartCoordinateSystem:=',... _
    'Global', 'UDMId:=' ' ', 'MaterialName:=' 'vacuum', 'SolveInside:=' true,
    'IsMaterialEditable:=' true})
```

V druhém oblouku se musí jít při označení bodů v každé bariéře opačným směrem. Střed druhého oblouku je tedy druhý bod od konce a počáteční bod druhého oblouku je třetí bod konce v každé bariéře. Úhel druhého oblouku je zadán s kladným znaménkem, protože se jedná o směr, který je shodný se směru hodinových ručiček.

V původním skriptu je však bohužel chyba, a proto se musí vytvořit v každé bariéře speciální přímka pro propojení dvou oblouků, která umožní pozdější sjednocení celé plochy bariéry a její rotace okolo obvodu rotoru. Pomocí příkazů „Connect“ a „Unite“

je nutno nejprve propojit pomocnou přímkou s oběma oblouky, a poté vzniklou plochu s přímkami bariér magnetického toku. Pro pozdější vyřezání do rotoru je nutné vytvoření hraničních křivek bariér pomocí příkazu „CoverLines“.

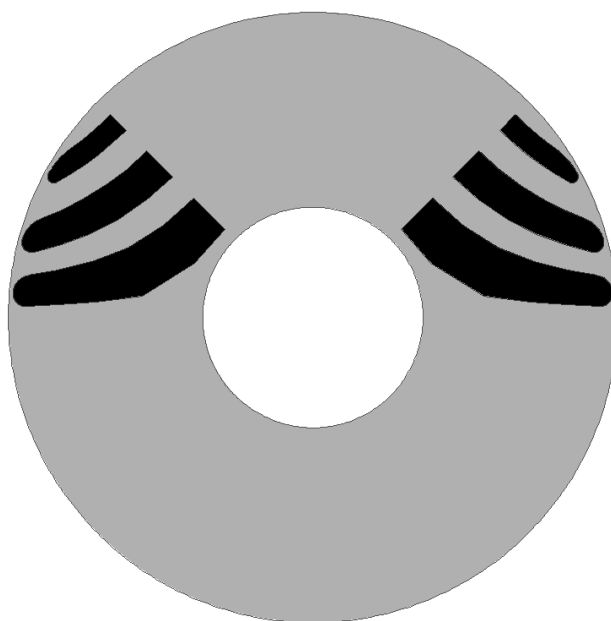


**Obr. 2.10: Spojení oblouků bariér magnetického toku**

```
for bkk = 1:rotor.Nb
    invoke(Editor, 'Connect', {'NAME:Selections', 'Selections:=' , ['Arc' num2str(bkk)
    '_' num2str(1) ',' 'Arc' num2str(bkk) '_' num2str(2)]});
end

for bkk = 1:rotor.Nb
    invoke(Editor, 'CoverLines', {'NAME:Selections', 'Selections:=' , ['Line' num2str(bkk)
    '_' num2str(2)], 'NewPartsModelFlag:=' , 'Model'});
    invoke(Editor, 'Unite', {'NAME:Selections', 'Selections:=' , ['Arc' num2str(bkk) '_'
    num2str(1) ',' 'Line' num2str(bkk) '_' num2str(2) ]},...
    {'NAME:UniteParameters', 'KeepOriginals:=' , false});
end
```

Po spojení půlky bariéry magnetického toku do jednotného celku jsou tyto plochy zrcadlově překopírovány přes osu y pomocí příkazu „DuplicateMirror“.



**Obr. 2.11: Kopírování ploch přes osu stroje**

Poté jsou pomocí příkazu „DuplicateAroundAxis“ původní i nové plochy okopírovány čtyřikrát podle počtu pólů stroje. Nakonec je nutno bariéry vyřezat do rotoru pomocí funkce „Substract“.

```
for bkk = 1:rotor.Nb
    invoke(Editor, 'DuplicateAroundAxis', {'NAME:Selections', 'Selections:=' , ['Arc'
num2str(bkk) '_' num2str(1) ']' 'Arc' num2str(bkk) '_' num2str(1) '_' num2str(1)],
'NewPartsModelFlag:=' , 'Model'}, {'NAME:DuplicateAroundAxisParameters',
'CreateNewObjects:=' , true, 'WhichAxis:=' , ...
'Z', 'AngleStr:=' , [num2str(360/(rotor.p*2)) 'deg'], 'NumClones:=' ,
[num2str(rotor.p*2)]}, {'NAME:Options', 'DuplicateAssignments:=' , false});
end
```



**Obr. 2.12: Finální geometrie rotoru**

### **2.4.6 Změna geometrie rotoru**

Největší výhodou parametrického modelu je jeho variabilita a snadná úprava během další práce. Změna parametrů rotoru je možná díky funkci `maxwell_modify_variables(barrier,rotor)`, která je volána v hlavní části programu. Tato funkce umožňuje měnit veškeré parametry, jako jsou vnější i vnitřní průměr nebo rozměry bariér magnetického toku.

### 3 NÁVRH SYNCHRONNÍHO RELUKTANČNÍHO STROJE SPOUŠTĚNÉHO ZE SÍTĚ S VYUŽITÍM STATORU ZADANÉHO INDUKČNÍHO STROJE

#### 3.1 Zadaný indukční stroj

V této části práce není proveden plnohodnotný výpočet návrhu stroje. Místo toho je použit stator z třífázového čtyřpólového indukčního stroje s parametry v tab. 3.1. Rotor stroje je převzatý z kap. 2. Při vnitřním průměru statoru 84 mm je vnější průměr rotoru zvolen na 83 mm tak, aby šířka vzduchové mezery byla 0,5 mm, což je adekvátní hodnota pro stroje podobné velikosti.

**Tab. 3.1: Parametry zadaného indukčního stroje**

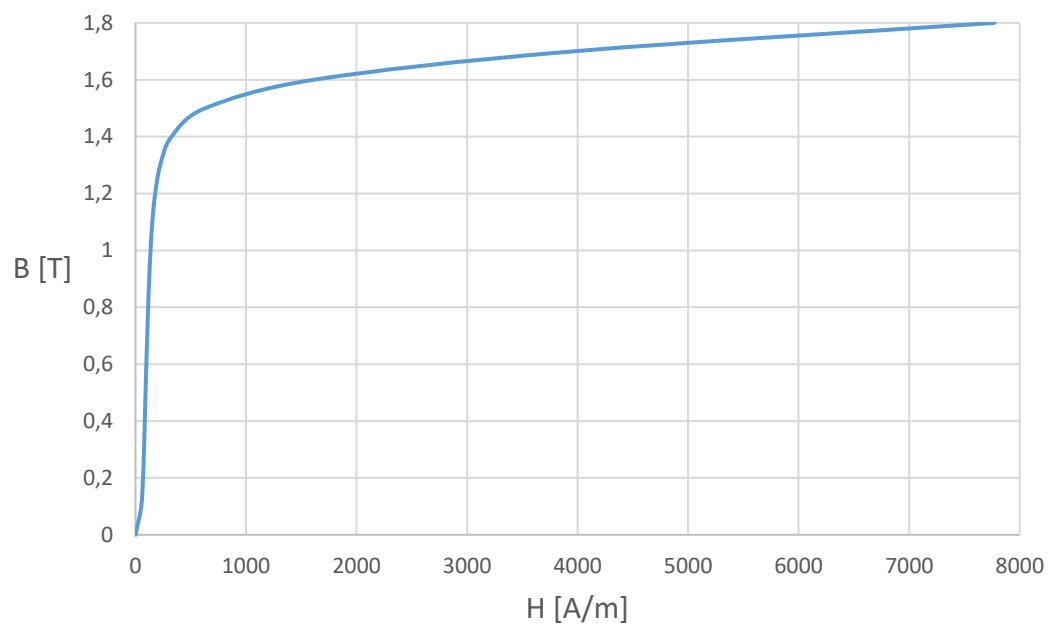
Výkon [kW]	1,5
Jmenovitý moment [Nm]	9,9
Jmenovitá proud [A]	3,43
Napájecí napětí [V]	400
Jmenovité otáčky [ot./min]	1446
Účinník [-]	0,744
Účinnost [%]	83,9

Geometrické rozměry zadaného indukčního stroje jsou následující:

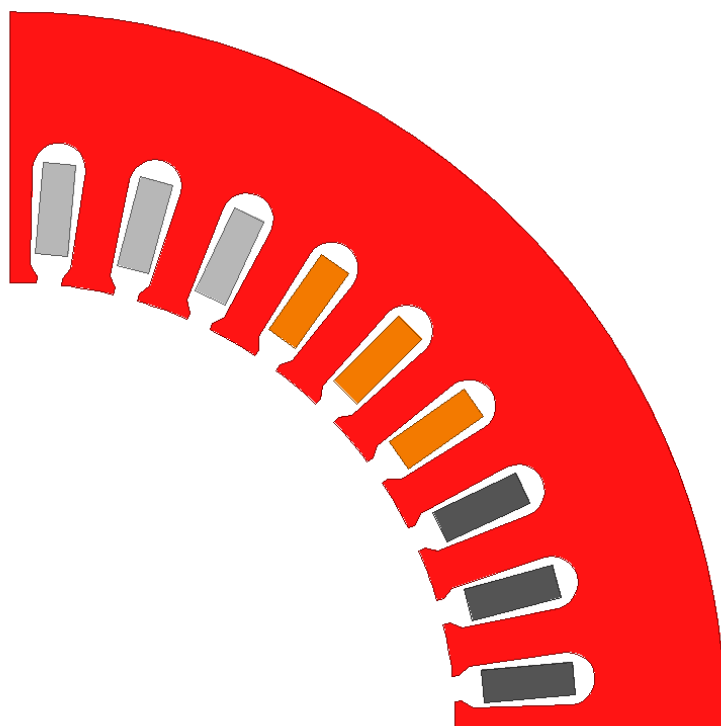
**Tab. 3.2: Geometrické rozměry zadaného indukčního stroje**

Vnější průměr statoru [mm]	135
Vnitřní průměr statoru [mm]	84
Délka svazku [mm]	160
Vnější průměr rotoru [mm]	83,4
Vnitřní průměr rotoru [mm]	30

Stator zadaného indukčního stroje obsahuje 36 drážek s klasickým jednovrstvým rozloženým vinutím a je stejně jako rotor vyroben z plechů M470-50A s následující B-H křivkou:



**Obr. 3.1: B-H křivka plechů M470-50A**



**Obr. 3.2: Stator zadaného indukčního stroje**

Ve statoru je uloženo klasické jednovrstvé rozložené vinutí s těmito parametry:

**Tab. 3.3: Statorové vinutí zadaného indukčního stroje**

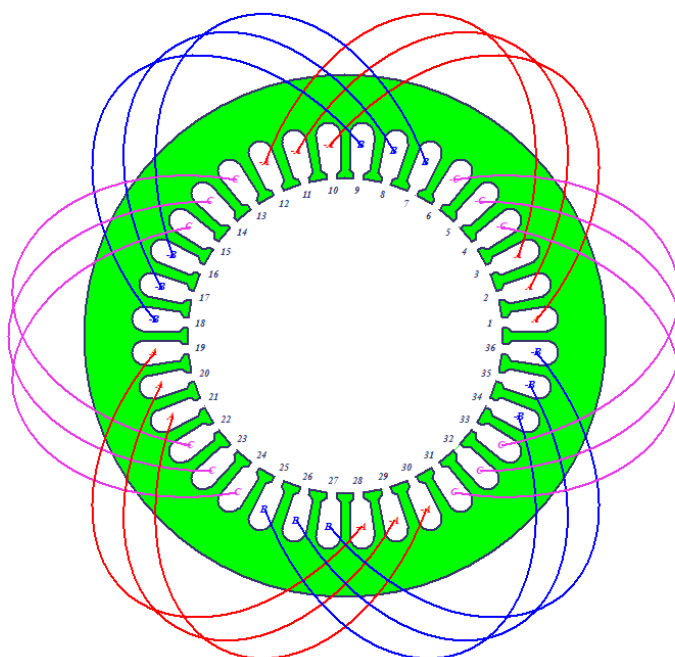
Počet drážek	36
Počet vodičů v drážce	39
Počet fází	3
Počet pólů	4
Počet drážek na pól a fázi	3
Cívkový krok	9

Počet drážek na pól a fázi se vypočte podle vzorce:

$$q = \frac{Q_s}{p \cdot m} = \frac{36}{4 \cdot 3} = 3 \quad (3.1)$$

Cívkový krok se vypočte podle následující rovnice:

$$\tau_p = m \cdot q = 3 \cdot 3 = 9 \quad (3.2)$$



**Obr. 3.3: Statorové vinutí v programu RMxpert**



## 4 OVĚŘENÍ PARAMETRŮ STROJE V PROGRAMU ANSYS MAXWELL

### 4.1 Využití rovin symetrie a nastavení okrajových podmínek

V programu ANSYS Maxwell je využito symetrie modelu ve dvou rovinách a je aplikováno zjednodušení motoru na jednu čtvrtinu. Pro správný výpočet je podle [17] nutné na hranice symetrie a modelu aplikovat tyto okrajové podmínky:

1. Dirichletova podmínka - Na vnější okraj statoru je vložena podmínka konstantního vektorového potenciálu ve tvaru:

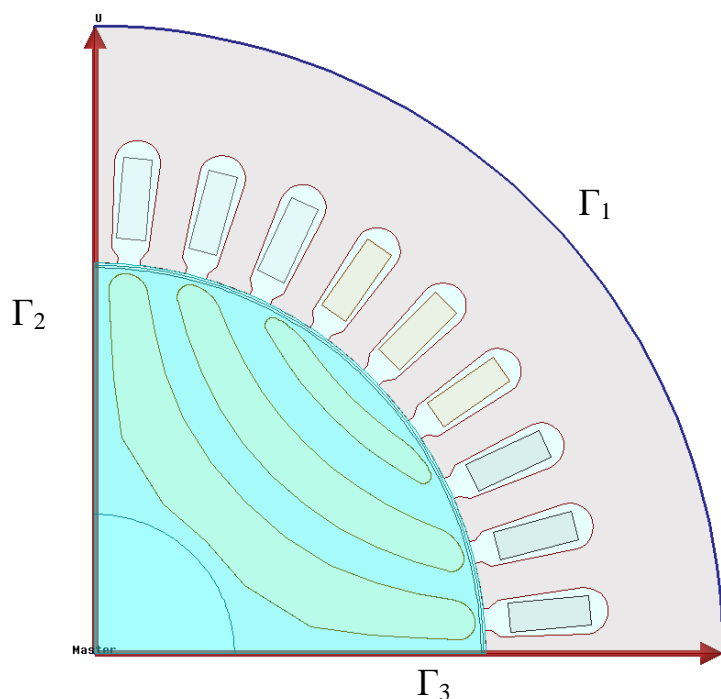
$$A_z \big|_{\Gamma_1} = 0 \quad (4.1)$$

Tato okrajová podmínka zajistí rovnoběžnost siločar s uvažovanou hranicí.

2. Neumannova podmínka - Na obě roviny symetrie se aplikuje podmínka zajišťující kolmost indukčního toku ve tvaru:

$$\frac{\delta A_z}{\delta n} \big|_{\Gamma_2, \Gamma_3} = 0 \quad (4.2)$$

Jelikož je potřeba zajistit kolmost siločar u obou rovin symetrie zároveň je třeba využít tzv. řídicích a řízených okrajových podmínek (angl. „Master“ a „Slave“). Siločáry budou na tedy na obě hranice kolmé.



Obr. 4.1: Použité okrajové podmínky

## 4.2 Nastavení pohybu motoru

První možností nastavení výpočtu je simulace za konstantních otáček. V tomto případě probíhá výpočet už za ustálených otáček, a proto není zkoumán dynamický děj při rozběhu stroje.

Na základě [18] je druhou možností počítat rozběh motoru založený na pohybové rovnici:

$$J\beta + \lambda\omega + M_z = M_{em} \quad (4.3)$$

V ustáleném stavu, kde  $\beta=0$  pak platí:

$$\begin{aligned} \lambda &= \frac{M_{em} - M_z}{\omega} = \frac{M_{mech}}{\omega} = \frac{P_{ztr,mech}}{\omega^2} = \frac{P_{ztr,mech}}{(\frac{2\pi \cdot n}{60})^2} \\ &= \frac{13}{(\frac{2\pi \cdot 1500}{60})^2} \\ &= 5,2687 \cdot 10^{-4} \text{ Nms/rad} \end{aligned} \quad (4.4)$$

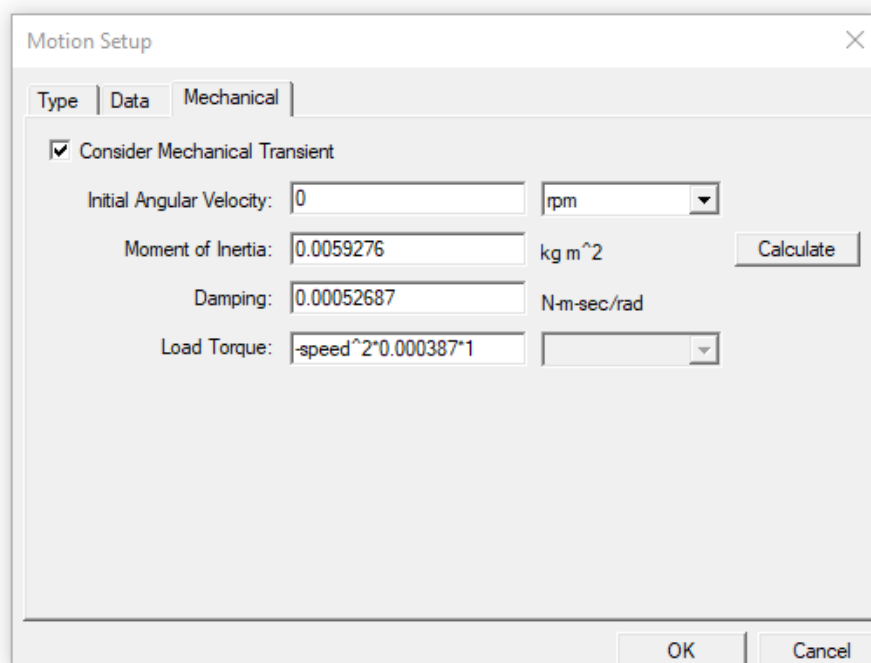
, kde pro  $P_{ztr,mech}$  je zvolena hodnota 13 W jako u stejně velkých indukčních strojů, za otáčky  $n$  je dosazeno 1500 ot./min, což jsou synchronní otáčky pro čtyřpólový stroj, které vypočtou se podle vzorce:

$$n = \frac{60 \cdot f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{4} = 1500 \text{ ot./min} \quad (4.5)$$

Směrnice zátěžného momentu byla vypočítána z momentové rovnice ventilátorové charakteristiky podle vzorce:

$$k = \frac{M_z}{\omega^2} = \frac{9,54}{(\frac{2\pi \cdot 1500}{60})^2} = 3,8664 \cdot 10^{-4} \quad (4.6)$$

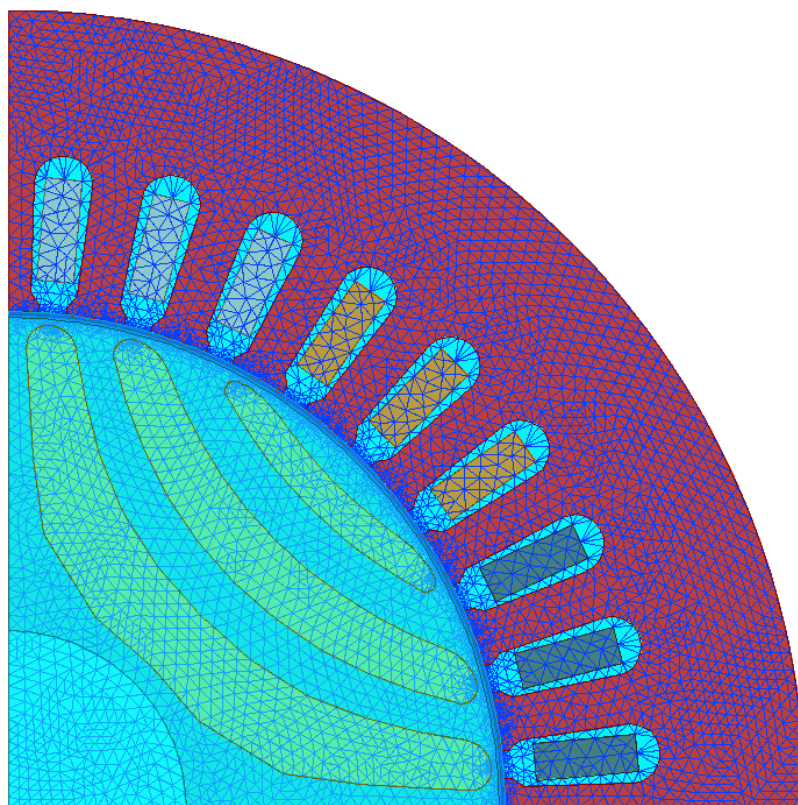
Mechanický děj je tedy nastaven pomocí čtyř parametrů: počáteční úhlové rychlosti („Initial Angular Velocity“), momentu setrvačnosti („Moment of Inertia“), faktoru tlumení („Damping“) a zátěžného momentu („Load Torque“). Počáteční úhlová frekvence je nastavena na nulovou hodnotu z důvodu zkoumání rozběhu motoru z nulových otáček a moment setrvačnosti je zvolen vzhledem k použití SynRM k pohonu čerpadel nebo pump. Zátěžný moment je nastaven se záporným znamínkem, protože se jedná o motor, a proto se musí zátěžný moment odečítat od hnacího momentu motoru.



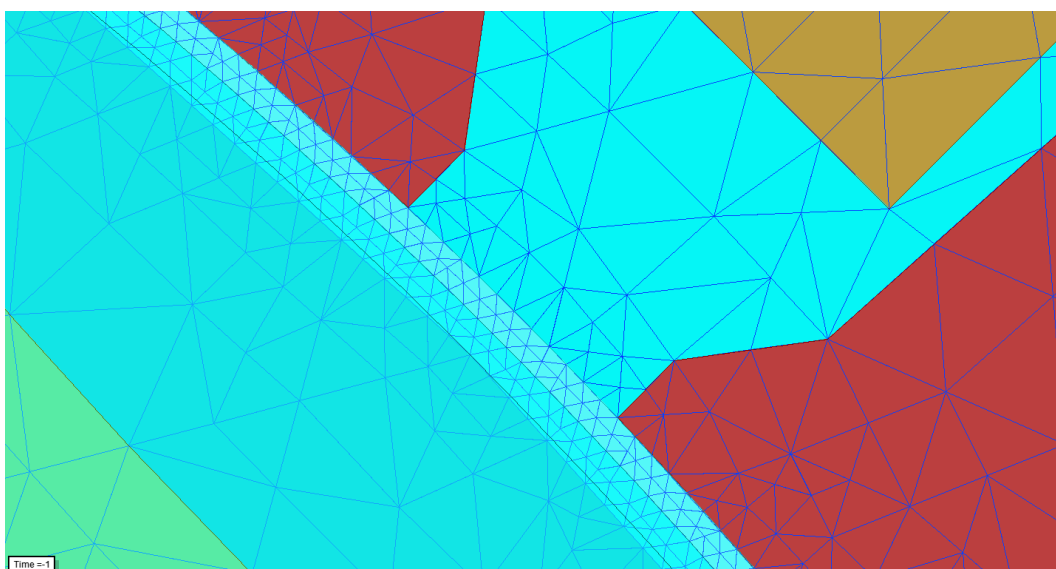
**Obr. 4.2:**Nastavení rozběhu podle pohybové rovnice

### 4.3 Nastavení sítě konečných prvků

Nejdůležitější částí sítě konečných prvků je vzduchová mezera. Šířka vzduchové mezery je ve zkoumaném modelu 0,5 mm. Aby mohl výpočet správně probíhat při různých pozicích rotoru, je nutné vzduchovou mezeru rozdělit na dvě stejně široké části a vytvořit uvnitř dostatečně jemnou síť konečných prvků. Délka jednotlivých prvků sítě se omezí na 0,25 mm pomocí možnosti v nabídce „*Mesh Opeations - Assign - On Selection - Length Based...*“. Síť konečných prvků ostatních částí stroje nemusí být tak jemná, a proto je jejich délka prvků nastavena na 1,5 mm.



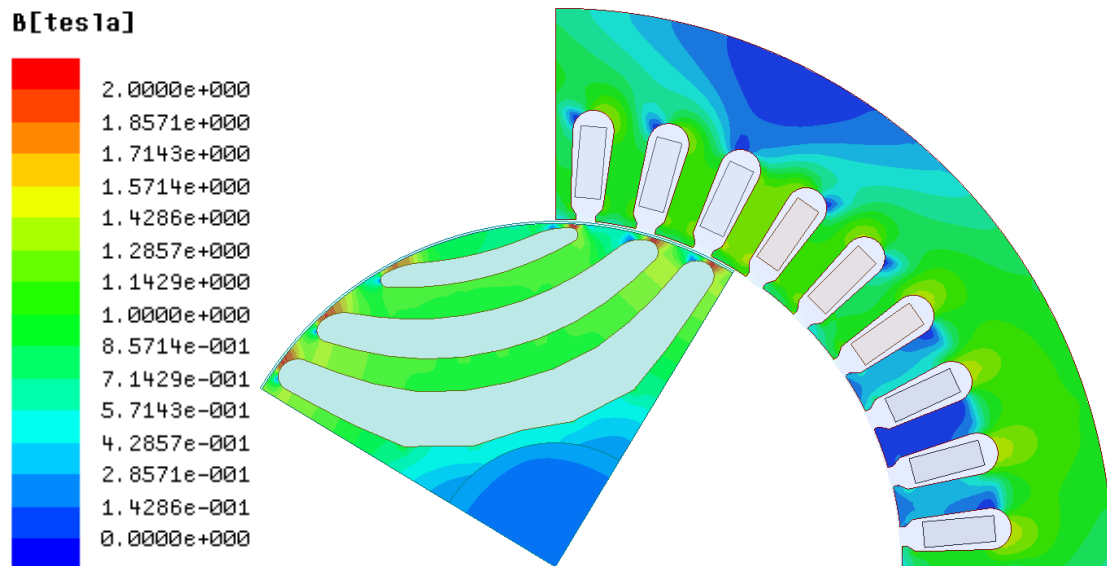
**Obr. 4.3: Síť konečných prvků**



**Obr. 4.4: Detail sítě konečných prvků ve vzduchové mezeře**

## 4.4 Sycení stroje

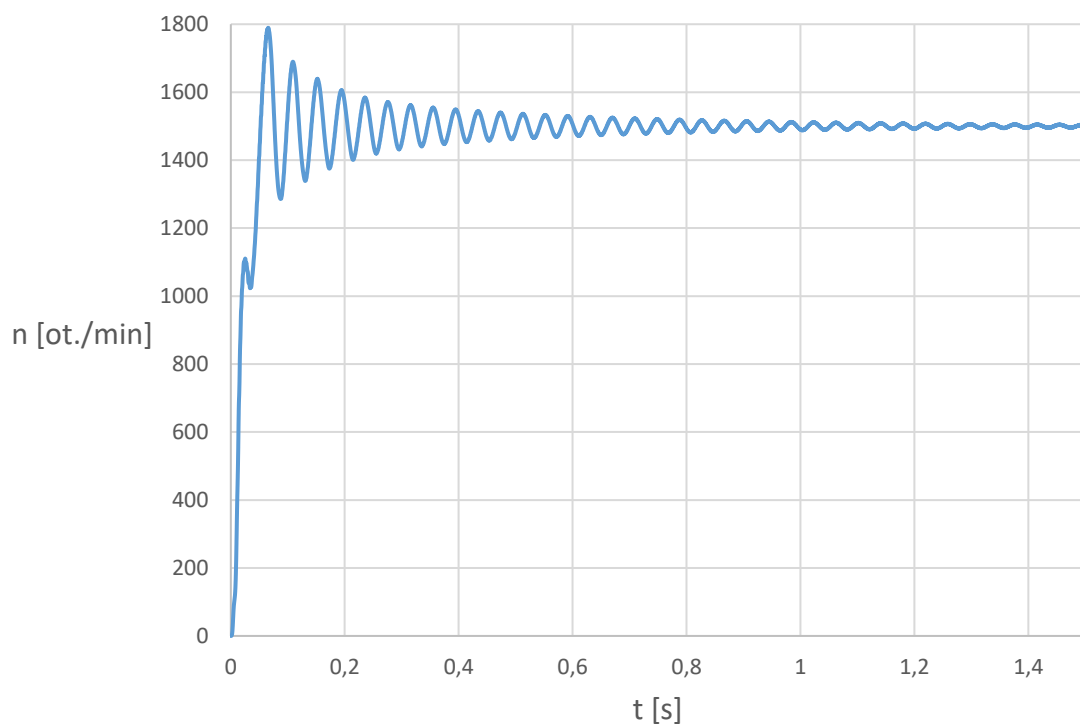
Hodnoty magnetické indukce ve většině plochy jha statoru i rotoru nabývají hodnot od 1 do 1,4 T. K přesycování dochází pouze v oblastech mezi krajem bariér magnetického toku a vnějším okrajem rotoru, kde magnetická indukce nabývá hodnot až 2 T. Sycení vnitřní části rotoru v blízkosti hřídele je nižší, jedná se o rozmezí hodnot od 0,2 do 0,6 T.



Obr. 4.5: Rozložení magnetická indukce stroje

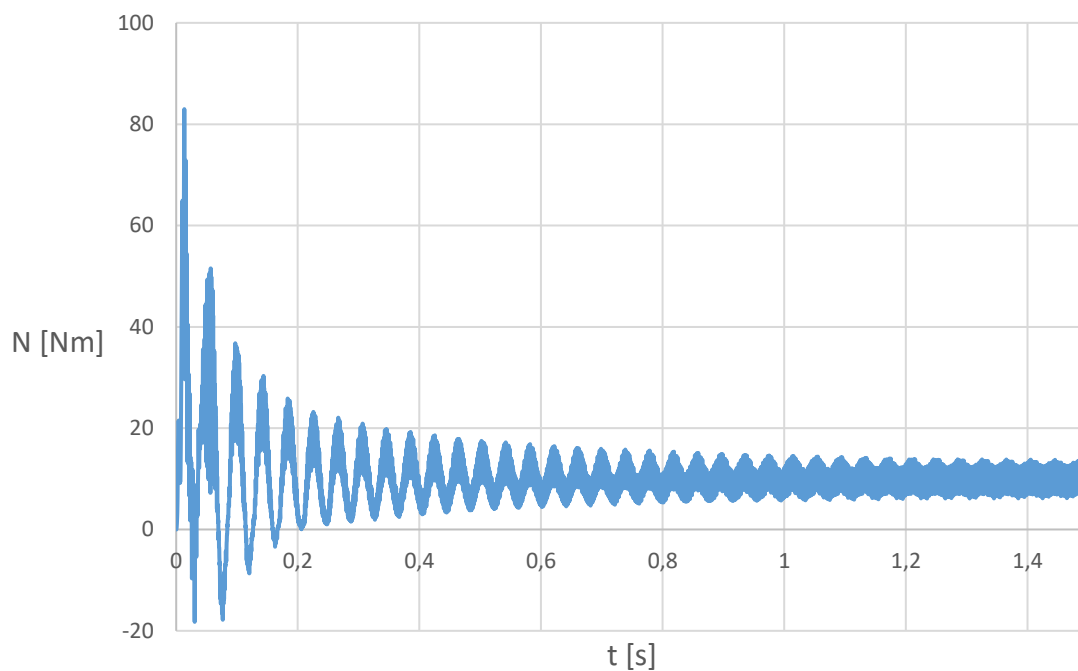
## 4.5 Rozběh stroje

Délka výpočtu rozběhu stroje je zvolena na hodnotu 1,5 s při kroku  $2 \cdot 10^{-4}$  s. Během rozběhu nastává tlumený kmitavý děj. Při prvotním nárůstu otáček dochází k výskytu kolena v okolí hodnot 1050 ot./min. Během velmi krátkého času průběh otáček nabírá záporný směr a hned poté se otáčky začínají zvyšovat. Tento jev je nežádoucí, protože prodlužuje dobu ustálení otáček stroje. Největší amplituda kmitů otáček dosahuje 500 ot./min při hodnotách od 1300 do 1800 ot./min. K ustálení hodnot dochází až v časech větších než 1 s, jak lze pozorovat na obr. 4.6.



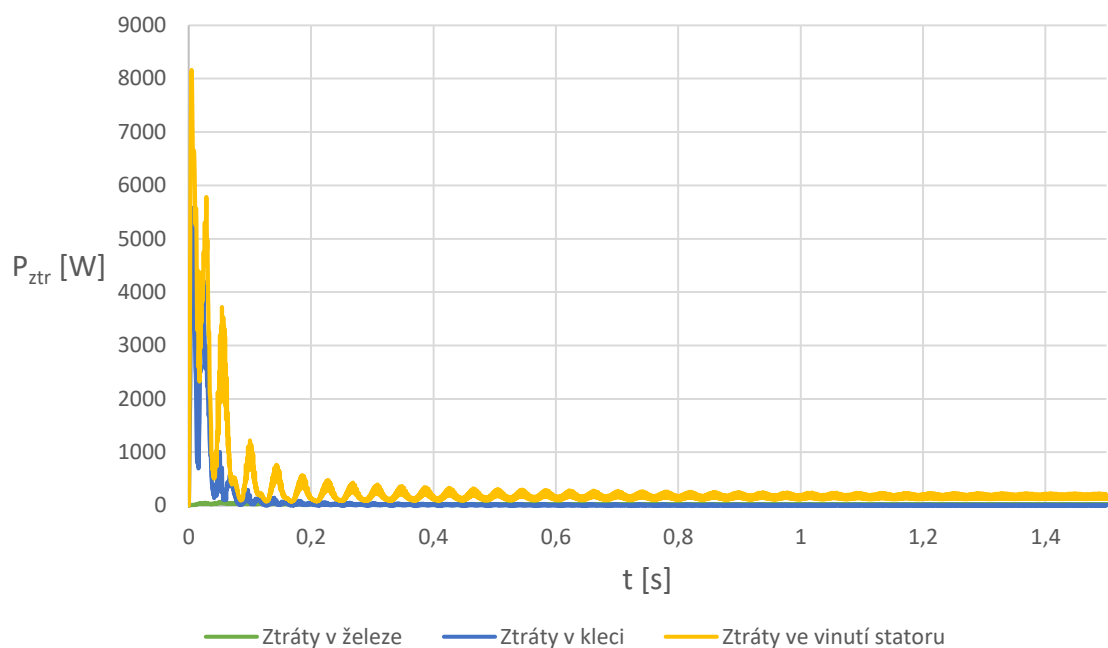
**Obr. 4.6: Otáčková charakteristika při rozběhu**

Moment kmitá při rozběhu maximálně od +82 Nm do -18 Nm. S velkým rozkmitem momentu při rozběhu souvisí velký odebíraný proud. Průběh momentu je velmi rozkmitaný i při čase po 1 s, což lze snadno vidět na obr. 4.7.

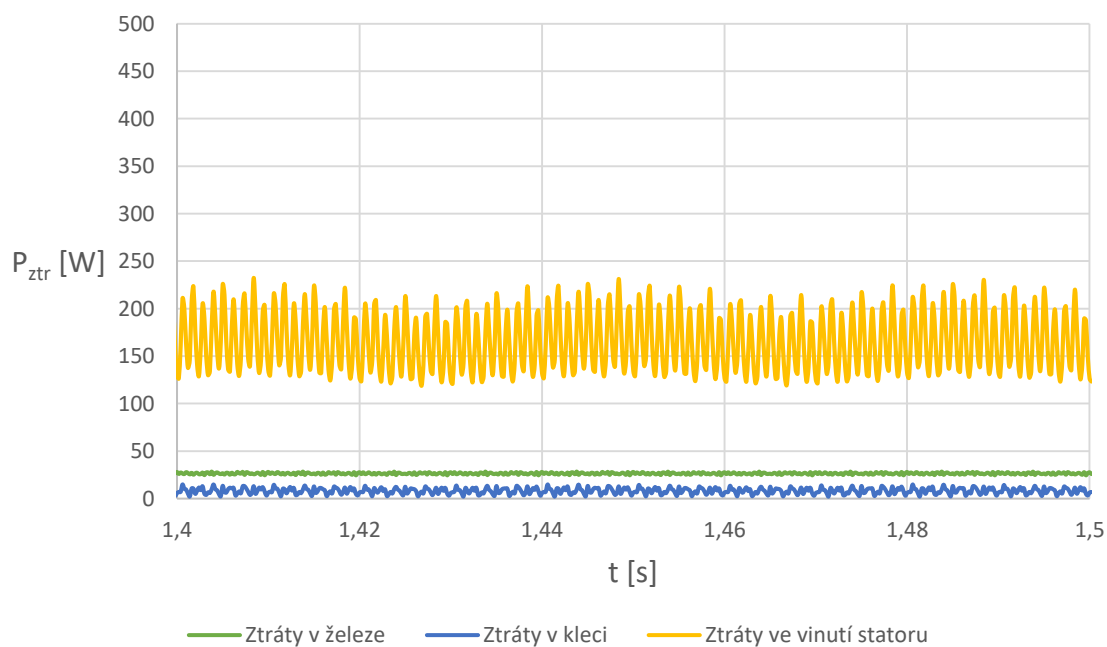


**Obr. 4.7: Momentová charakteristika při rozběhu**

Nejvyšší podíl na celkových ztrátách mají Jouleovy ztráty ve vinutí statoru, které souvisí s vysokým odběrem proudu při rozběhu.



**Obr. 4.8: Časový průběh ztrát**



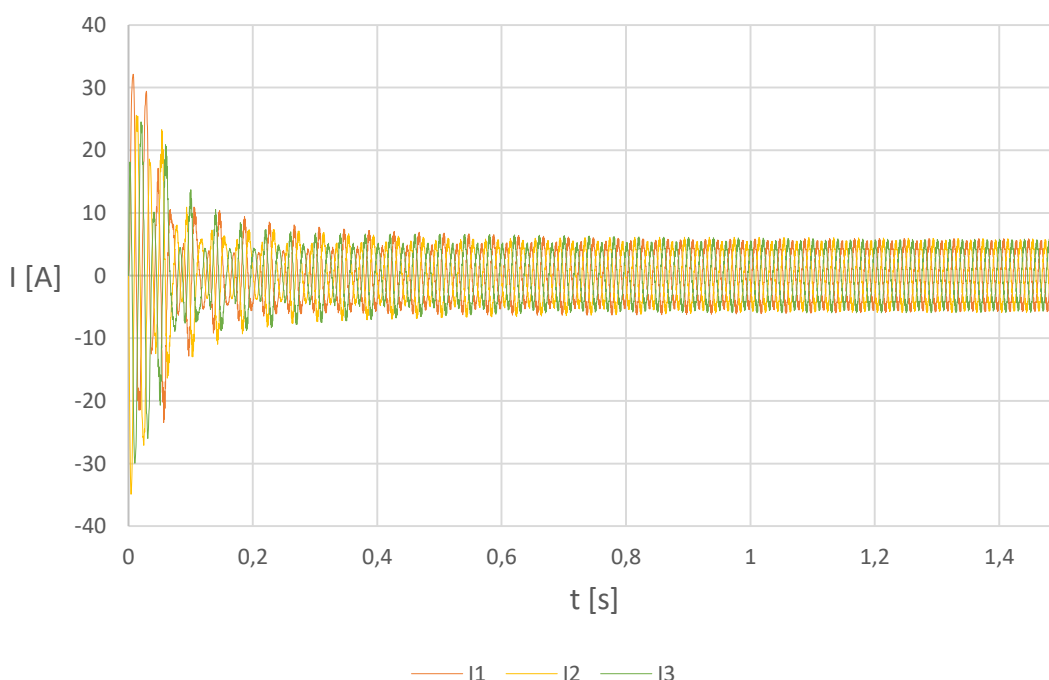
**Obr. 4.9: Časový průběh ztrát v ustáleném stavu**

Ztráty stroje v ustáleném čase jsou vypsány v tab. 4.1. I při započítání koeficientu výroby u ztrát v železe jsou tyto ztráty asi čtyřikrát menší než ztráty ve statoru. Ztráty v kleci jsou vůči statorovým ztrátám naprosto minimální.

**Tab. 4.1: Jednotlivé složky ztrát stroje**

Jouleovy ztráty ve vinutí statoru [W]	168,03
Ztráty v kleci [W]	8,22
Ztráty v železe [W]	26,49

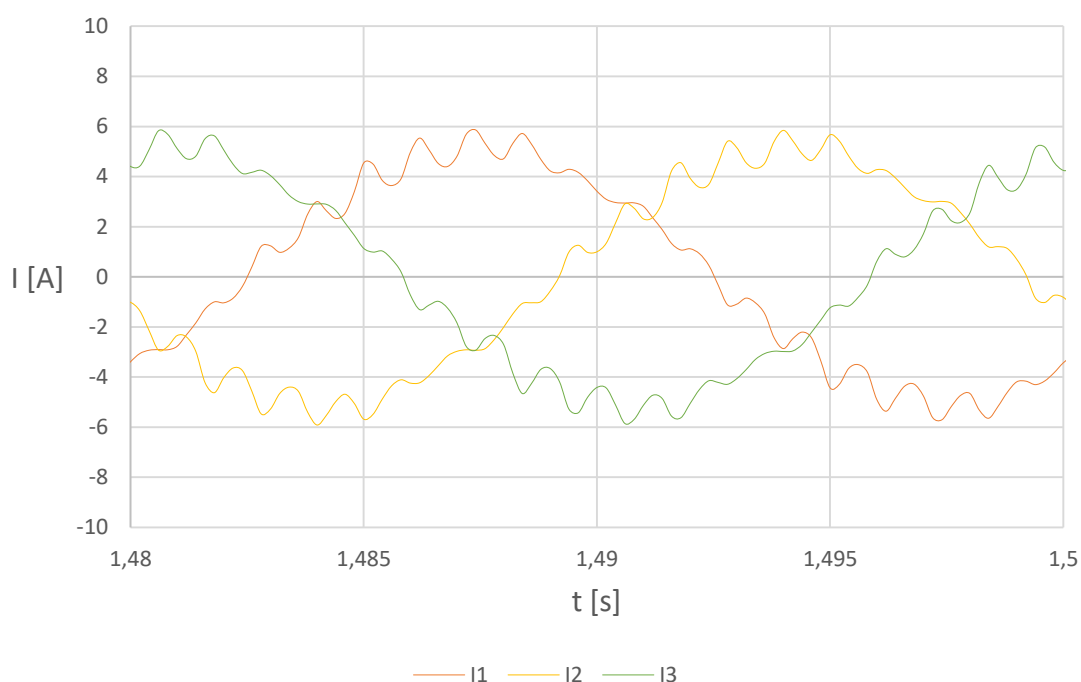
Záběrný proud zobrazený na obr. 4.10 nabývá v první půlmině hodnot až 35 A ve špičkové hodnotě, což je zhruba šestinásobek maxima ustálené hodnoty proudu 6 A.



**Obr. 4.10: Časový průběh proudu při rozběhu**

Na obr. 4.11 lze sledovat průběh ustáleného proudu během jedné periody v časech 1,48 až 1,5 s. Odebíraný proud má i v době ustálení silně nesinusový charakter. Po celé délce periody se objevuje velmi výrazné zvlnění proudu. Tento charakter proudu je příčinou nižšího účinku odebíraného proudu ve srovnání s indukčním motorem.





**Obr. 4.11: Detail průběhu ustáleného proudu během jedné periody**

## 4.6 Vypočtené hodnoty v ustáleném stavu

Jako kvalitativní ukazatel vlastností stroje se používají účinnost a účinník odebíraného proudu. Mechanický výkon se vypočte podle vztahu:

$$P_{mech} = M \cdot \frac{2\pi \cdot n}{60} \quad (4.7)$$

Účinnost stroje se vypočte podle vzorce:

$$\eta = \frac{P_{mech}}{P_{mech} + P_{J,s} + P_{J,r} + k_v \cdot P_z + P_{ztr,mech}} \cdot 100 \quad (4.8)$$

, kde za koeficient výroby  $k_v$  je zvolena hodnota 1,7 podle literatury [19]. Za mechanické ztráty je dosazena hodnota 13 W s ohledem na podobné stroje těchto rozměrů.

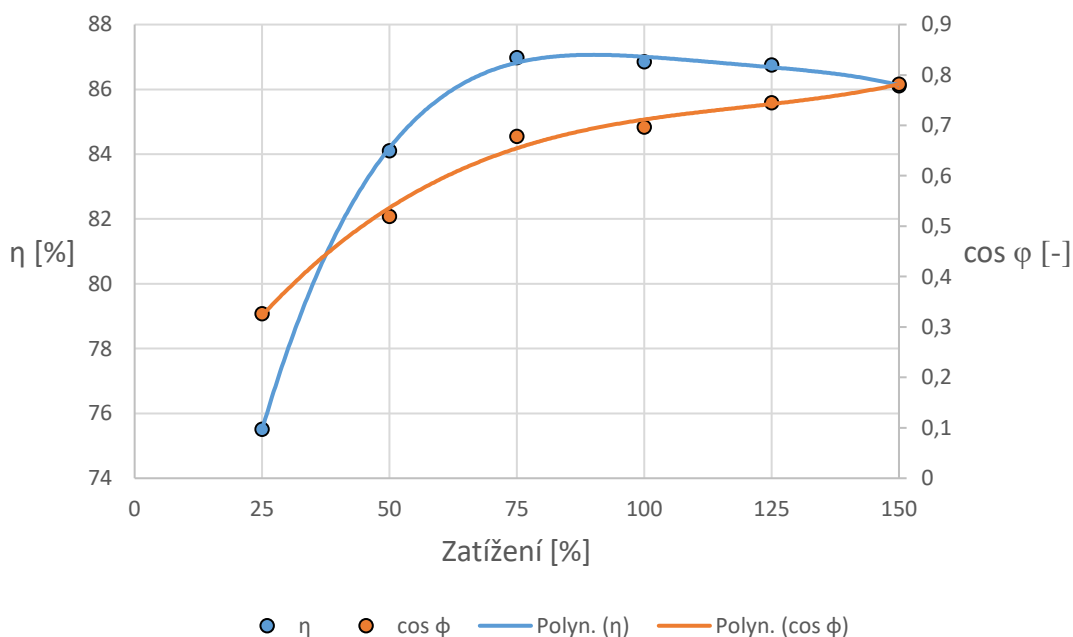
Účinník odebíraného proudu lze vypočítat podle vzorce:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{u_{12} \cdot i_1 \cdot u_{23} \cdot i_2 \cdot u_{31} \cdot i_3}{U_{12,ef} \cdot I_{1,ef} \cdot U_{23,ef} \cdot I_{2,ef} \cdot U_{31,ef} \cdot I_{3,ef}} \quad (4.9)$$

**Tab. 4.2: Vypočítané hodnoty stroje v ustáleném stavu**

Otáčky [ot./min]	1501,95
Moment [Nm]	9,80
Mechanický výkon [W]	1541,25
Účinnost [%]	86,85
Účíník [-]	0,6966

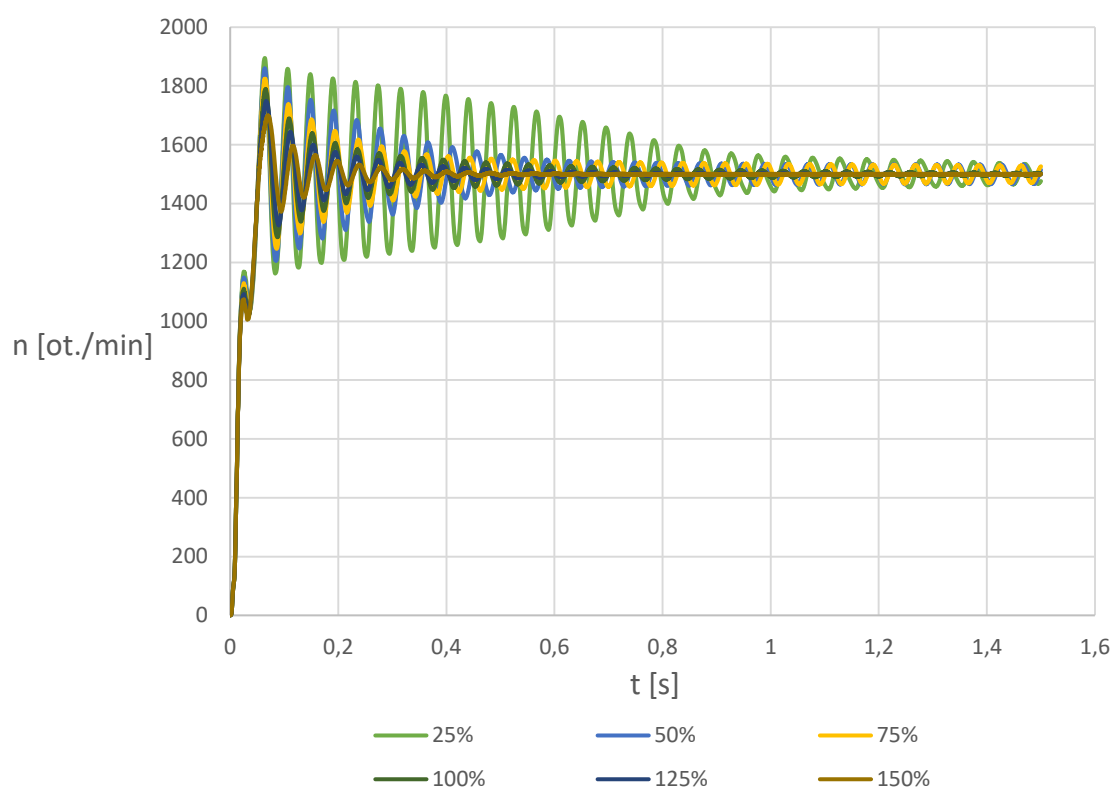
Velmi důležitou variantou zkoumání je použití motoru pro aplikace s různým zatížením, proto byl proveden výpočet motoru při zatížení od 25 do 150 % nominálního zatížení. Na obr. 4.12 lze sledovat průběh účinnosti a účíníku při zatížení od 25 do 150 %. Účinnost je velmi nízká při zatížení 25 a 50 %, při větším zatížení však významně naroste. Mezi hodnotami účinnosti při 75, 100 a 125 % zatížení je jen velmi malý rozdíl. Při zatížení 150 % už účinnost znovu klesá. Účíník roste plynule se zatížením. Hodnot kolem 0,7 a výše nabývá až při zatížení 75 % a větším.



**Obr. 4.12: Průběh účinnosti a účíníku při různém zatížení**

Na obr. 4.13 je možno porovnat průběh otáček při rozběhu od 25 do 150 % zatížení. Z grafu otáček lze jasně vyčíst, že se zvyšujícím se zatížením se snižuje amplituda kmitů otáček a zároveň se zkracuje doba ustálení. Při zatížení 25 % kmitají otáčky v první

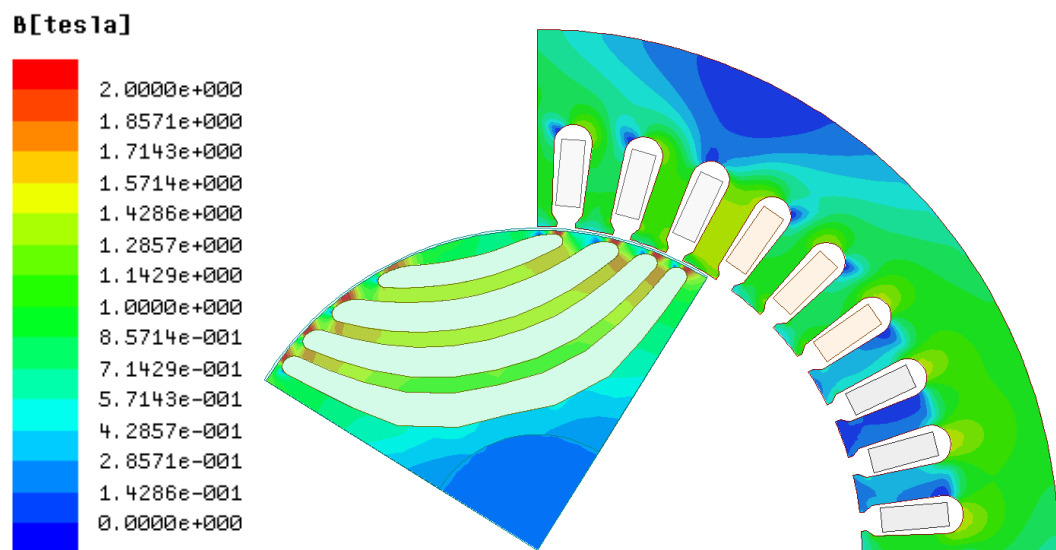
periodě kmitů od 1170 do 1880 ot./min a graf se začíná přibližovat ustáleným hodnotám až při čase delším než 1 s. Naopak při zatížení 150 % dochází ke kmitání od 1390 do 1680 ot./min a k ustálení dochází už při čase 0,5 s. Zrychlené ustálení s větším zatížením je logický jev, který souvisí se setrvačností zátěže. Větší břemeno s vyšším momentem setrvačnosti nebude tak moc ovlivněno kmitáním momentu při rozběhu, a proto dojde k ustálení v kratším čase.



**Obr. 4.13: Průběh otáček při různém zatížení**

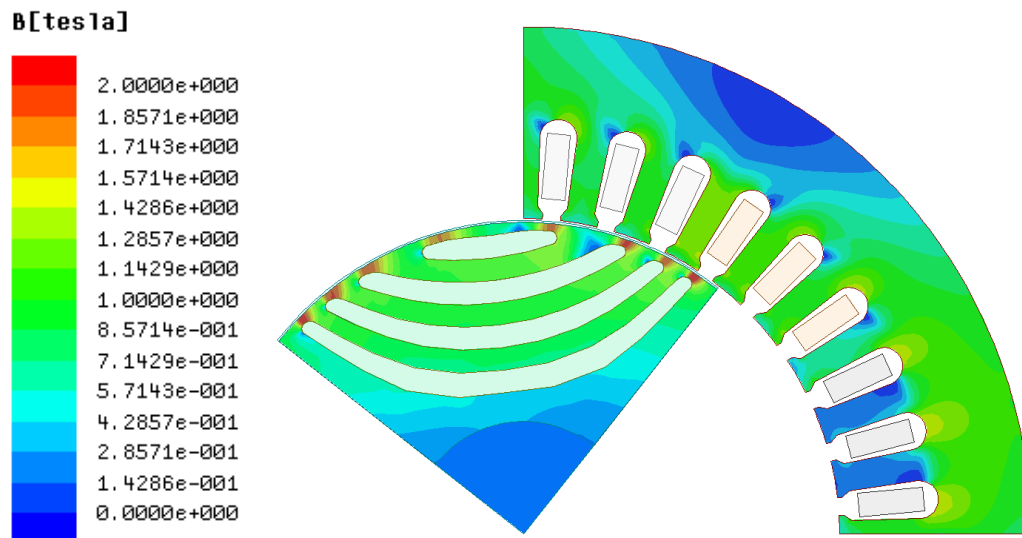
## 5 VLIV GEOMTERIE NA VLASTNOSTI STROJE

První variací, která byla provedena na rotoru stroje byla změna počtu bariér magnetického toku ze tří na čtyři. Rozměry bariér magnetického toku směrem od vnějšího obvodu rotoru jsou [3; 4; 4; 4] mm a šířky rotoru mezi bariérami jsou [0.5; 3; 3; 3; 4] mm. Na Obr 5.1 lze pozorovat rozložení magnetické indukce této varianty. Je možno vidět, že v prostoru rotoru mezi bariérami magnetického toku dochází k přesycování materiálu až k hodnotám 1,7 a 1,8 T.



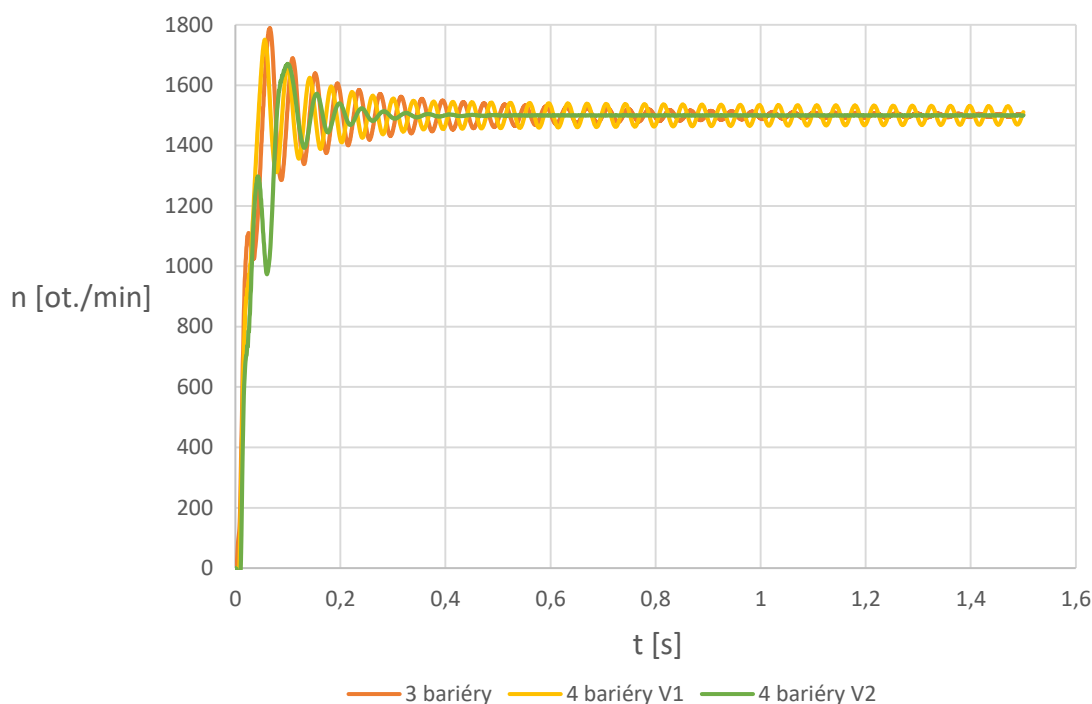
**Obr. 5.1: Rozložení magnetická indukce stroje se čtyřmi bariérami magnetického toku V1**

Z důvodu většího sycení je zvolena nová geometrie V2 se čtyřmi bariérami, u které jsou rozšířeny rozměry rotoru mezi bariérami ze 2 na 3 mm, rozměry rotoru mezi bariérami jsou tedy [0.5; 3; 3; 3; 4] mm. Pro zachování celkových rozměrů rotoru je šířka tří ze čtyř bariér magnetického toku naopak snížena ze 4 na 3 mm, takže všechny bariéry této varianty rotoru mají šířku 3 mm.



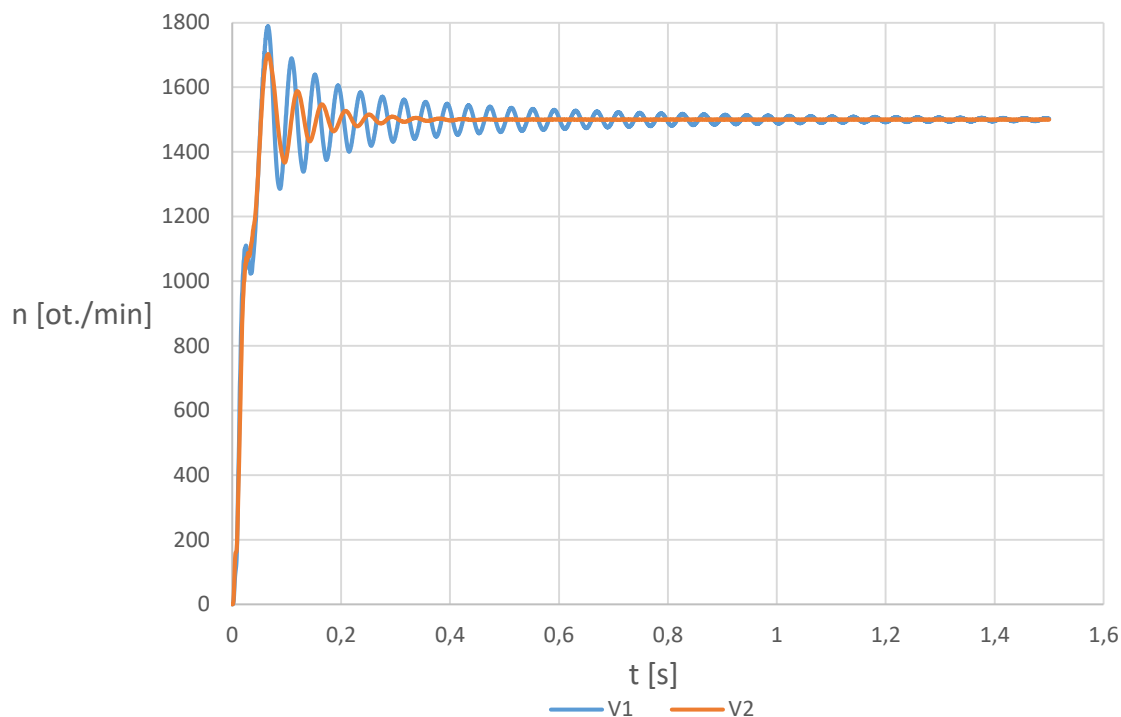
**Obr. 5.2: Rozložení magnetická indukce stroje se čtyřmi bariérami magnetického toku V2**

Na obr. 5.3 lze srovnat průběh otáček pro rotor se čtyřmi bariérami V1 a V2 vůči rotoru referenčnímu. U varianty V1 se čtyřmi bariérami dochází k menšímu rozkmitu otáček při rozběhu. Amplituda kmitů v první periodě kmitů otáček je nižší o 50 ot./min. Na průběhu otáček se čtyřmi bariérami V1 se nevyskytuje koleno při prvotním nárůstu otáček ještě před začátkem tlumených kmitů. Nepřítomnost tohoto jevu by měla teoreticky napomáhat ke kratšímu času ustálení otáček. Při prvních 10 periodách kmitů se opravdu průběh stroje se čtyřmi bariérami V1 ustaluje rychleji, ale poté dochází k otočení trendu a amplituda kmitů je od této doby větší než u průběhu stroje se třemi bariérami. Průběh otáček stroje se čtyřmi bariérami se od času 0,6 s ustaluje velmi pomalu a pokles amplitudy kmitů je bez přiblížení velmi těžké zpozorovat. Varianta rotoru V2 má velmi zajímavý průběh otáček při rozběhu. Při prvotním nárůstu otáček se objevuje asi 3x větší koleno na charakteristice než u rotoru se třemi bariérami. Pokles otáček v začátku kolena však začíná až při 1250 ot./min oproti 1100 ot./min u referenčního rotoru. Další průběh je však vzhledem k ostatním dvou průběhům velice pozitivní. Nejvyšší amplituda otáček verze V2 se rovná druhé periodě tlumených kmitů předchozích dvou variant. Ustálení otáček nastává u verze se čtyřmi bariérami V2 v čase 0,4 s, což je mnohem dříve než u předchozích dvou variant.



**Obr. 5.3: Porovnání průběhu otáček pro rotor se třemi a čtyřmi bariérami**

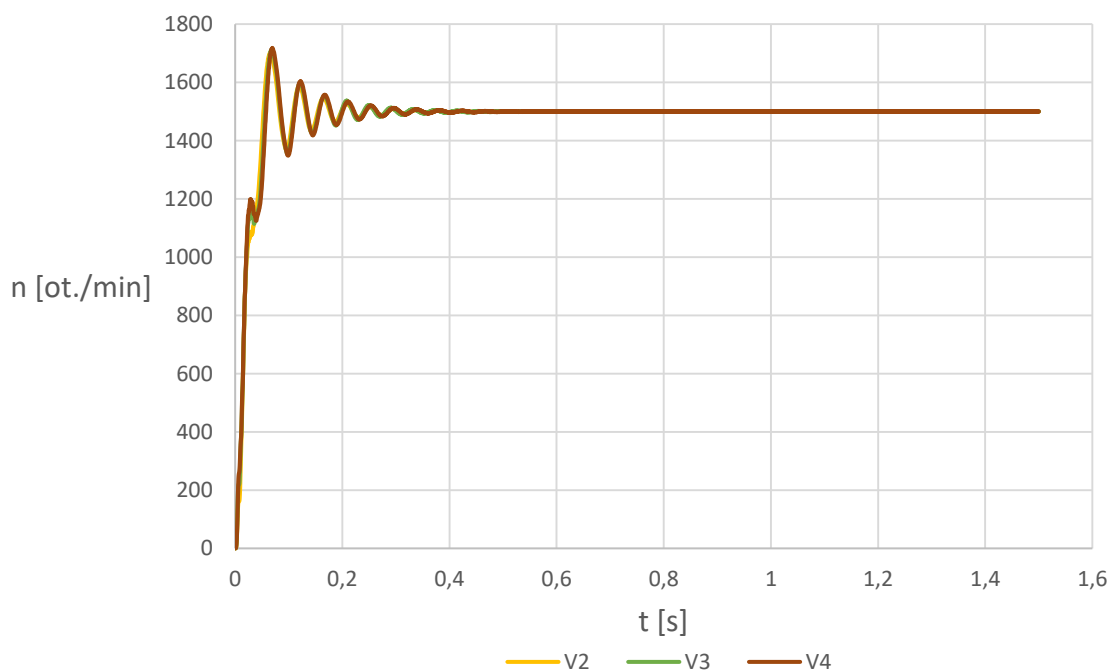
Další možnou variantou je prostá změna geometrie rotoru se třemi bariérami magnetického toku. První provedenou změnou je srovnání tloušťky všech tří bariér toku. Původní model (označen V1) má rozměry bariér [3; 5; 5] mm a rozměry rotoru mezi bariérami [2; 5; 3; 2]. Bariéra nejvzdálenější od středu je tedy nejužší a zbývající dvě bariéry mají stejný rozměr. Druhá verze rotoru (označena V2) má všechny bariéry stejně široké, tedy [4; 4; 4] mm. Rozměry mezi jednotlivými bariérami jsou také zvoleny se stejnou hodnotou 3 mm a všechny bariéry jsou posunuty dále od středu rotoru, protože první rozměr od středu rotoru je navýšen na 5 mm a poslední naopak zúžen na 1 mm. Celkové rozměry rotoru mezi bariérami jsou tedy [1; 3; 3; 5] mm.



**Obr. 5.4: Porovnání průběhu otáček verze V1 a V2**

Na obr. 5.4 lze vidět výrazné zlepšení průběhu otáček verze V2 oproti referenčnímu rotoru V1. U verze V2 dochází k mnohem menšímu počátečnímu rozkmitu otáček. Počáteční amplituda kmitů je nižší o 180 ot./min a k ustálení otáček dochází mnohem dříve při čase 0,4 s. Při prvotním nárůstu otáček nedochází u V2 ke vzniku kolena, ale pouze se krátce změní směr nárůstu otáček při hodnotě okolo 1050 ot./min. Z důvodu velkého sycení stroje v oblasti mezi krajem bariér magnetického toku a vnějším okrajem rotoru byla ve variantě V2 zvětšena tato vzdálenost z 0,5 na 1 mm.

Následující varianta V3 a V4 zkoumá zvětšení tloušťky nejvzdálenější bariéry od středu rotoru. Verze V3 má poslední bariéru rozšířenou ze 4 na 5 mm, ostatní bariéry zůstávají stejné. Celkové rozměry bariér V3 jsou tedy [5; 4; 4] mm. Rozměry prostoru mezi bariérami zůstávají stejné jako u varianty V2. U verze V4 je poslední bariéra rozšířena na 6 mm, ostatní zůstávají na 4 mm. Pro zachování celkových rozměrů rotoru byla vzdálenost mezi poslední bariérou a okrajem rotoru zkrácena na 0,5. Rozměry rotoru mezi bariérami V4 jsou tedy [0,5; 3; 3; 5].

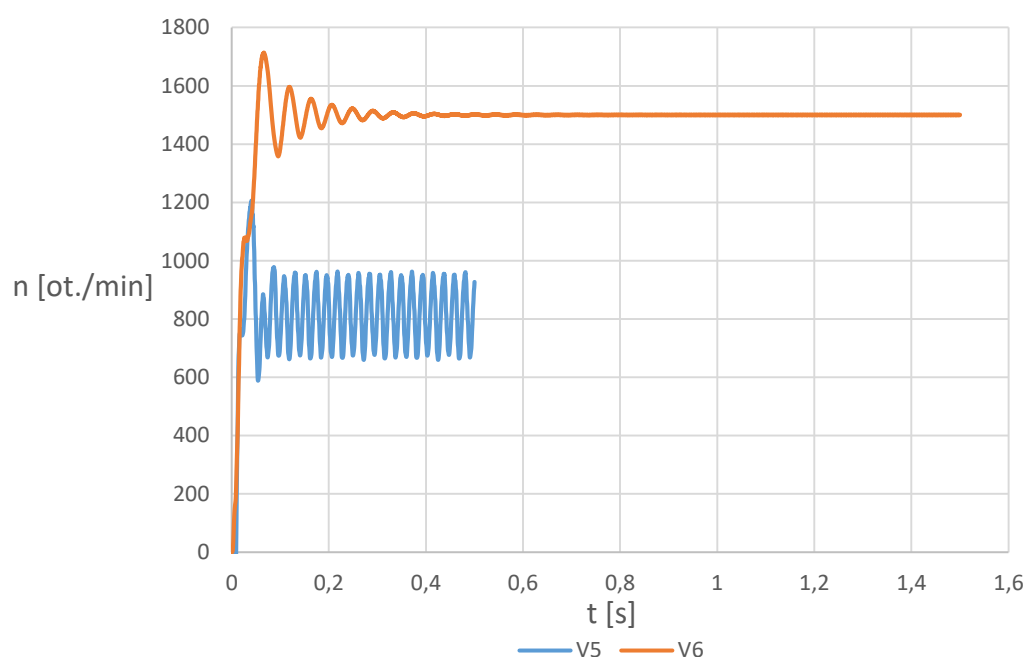


**Obr. 5.5: Porovnání průběhu otáček verzí V2, V3 a V4**

Na obr. 5.5 je možno sledovat průběh otáček verzí V2, V3 a V4. Průběh je ve všech částech grafu velmi podobný. Jedinou odchylkou je výskyt kolena při prvotním nárůstu otáček u verzí V3 a V4. Tyto varianty mají nejvzdálenější bariéru toku směrem od středu rotoru širší o 1 mm, respektive 2 mm. Nestejná tloušťka bariér toku tedy způsobuje při nárůstu otáček zakmitnutí charakteristiky kolem hodnot 1150 ot./min.

Varianta V5 vznikla z V2 rozšířením všech bariér ze 4 na 5 mm a rozšířením prostoru mezi vnějším obvodem rotoru a první bariérou toku z 1 na 2 mm. Na obr. 5.6 lze vidět, že rozběh varianty V5 bohužel nebyl úspěšný, protože otáčky nedosáhly ustálené synchronní hodnoty 1500 ot./min. Přílišná tloušťka bariér tedy není správná cesta k celkovému návrhu rotoru. U verze V6 je vrácena tloušťka bariér zpět na 4 mm. Oproti verzi V2, která má stejně tlusté bariéry jsou rozšířeny prostory mezi bariérami ze 3 na 4 mm.





**Obr. 5.6: Porovnání průběhu otáček V5 a V6**

Přehled rozměrů geometrie všech zkoumaných verzí je možno vidět v následující tabulce:

**Tab. 5.1: Přehled rozměrů různých variant rotoru**

	Rozměry bariér magnetického toku [mm]	Rozměry rotoru mezi bariérami [mm]	Vzdálenost bariér od kraje rotoru [mm]
V1	3; 5; 5	2; 5; 3; 2	0,5
V2	4; 4; 4	2; 4; 4; 2	1
V3	5; 4; 4	1; 3; 3; 5	1
V4	6; 4; 4	0,5; 3; 3; 5	1
V5	5; 5; 5	2; 3; 3; 5	1
V6	4; 4; 4	1; 4; 4; 3	1
4 bariéry V1	3; 4; 4; 4	2; 2; 2; 2; 3	0,5
4 bariéry V2	3; 3; 3; 3	0,5; 3; 3; 3; 4	0,5

V tab. 5.2 lze porovnat složky jednotlivé složky ztrát a vypočtené hodnoty účinnosti a účinníku pro všechny zkoumané verze rotoru. Referenční model rotoru (V1) má i přes delší dobu ustálení nejvyšší hodnoty účinnosti a účinníku. Všechny ostatní verze rotoru

mají zhruba o 1 % horší účinnost z důvodu vyšších ztrát ve statoru. Ztráty v železe se u všech verzí pohybují od 26 do 28 W a odchylky jsou tedy minimální. Jouleovy ztráty v rotoru jsou vyšší pouze u rotoru se čtyřmi bariérami z důvodu větší plochy klece vůči variantám se třemi bariérami. Rozdíly v účinnosti mezi všemi ostatními verzemi, kromě referenční, se pohybují pouze v rámci setin až desetin procenta.

**Tab. 5.2: Porovnání ztrát, účinku a účinnosti všech zkoumaných verzí rotoru**

	$P_{j,s}$ [W]	$P_z$ [W]	$P_{j,r}$ [W]	$\cos \varphi$ [-]	$\eta$ [%]
V1	168,03	26,49	8,22	0,6966	86,85
V2	186,63	27,08	6,44	0,6559	85,76
V3	187,45	26,75	7,16	0,6583	85,71
V4	190,46	26,35	9,53	0,6551	85,49
V5	-	-	-	-	-
V6	185,71	26,09	7,27	0,6605	85,85
4B V1	180,04	27,82	13,76	0,6744	85,71
4B V2	183,76	26,8	11,37	0,6646	85,68

# ZÁVĚR

Tato diplomová práce se zabývá souhrnnou problematikou synchronních reluktančních strojů spouštěných ze sítě a návrhem geometrie jejich rotoru.

V první části je vytvořena literární rešerše obsahující základní teoretické informace. Jsou zde informace o účinnostních třídách elektrických strojů, magnetické reluktanci, schémata v d-q osách a napěťové, momentové i výkonové rovnice. Nechybí ani přehled aktuálně dostupných synchronních reluktančních strojů na trhu a informace o výzkumu v této oblasti. Je zde také vykreslen fázorový diagram v ustáleném stavu.

V druhé části je vysvětlena a matematicky popsána geometrie reluktančního rotoru s bariérami respektující přirozenou cestu toku v plném rotoru. Každá bariéra toku je popsána třemi parametry, které jsou v této práci vysvětleny. Matematický popis metody je doplněn o ilustraci plného rotoru i parametrů ovlivňující bariéry toku. Ze všech možných typů je vybrán rotor respektující přirozený tvar magnetických siločar v plném rotoru.

Dále je v druhé části práce vytvořen referenční model rotoru synchronního reluktančního stroje se třemi bariérami toku. Parametrický model rotoru je vytvořen v programu ANSYS Maxwell spolupracujícím s programem Matlab. Pomocí funkce „Record Script to File“ je nahrán skript z ANSYS Maxwell a upraven pro Matlab. V této práci jsou vytvořeny bariéry toku pomocí základních geometrických útvarů.

V třetí části je navržen kompletní stroj za pomoci zadaného čtyřpólového indukčního stroje o výkonu 1,5 kW. S ohledem na vnitřní průměr statoru je zvolena šířka vzduchové mezery na 0,5 mm. Ve 36 drážkách statoru je uloženo jednovrstvé rozložené vinutí se třemi drážkami na pól a fázi a cívkovým krokem rovným devíti. Stator stroje i s vinutím je navržen v programu RMxpert a převeden do ANSYS Maxwell.

Ve čtvrté části jsou nejprve nastaveny všechny nutné aspekty pro provedení simulace. Díky využití symetrie je stroj redukován na čtvrtinu podle osy x a y. Na vnější obvod

statoru je aplikována Dirichletova okrajová podmínka pro zajištění rovnoběžnosti siločar s touto křivkou. Na obě roviny symetrie je přiřazena Neumannova podmínka zajišťující kolmost siločar na obě křivky. Rozběh stroje je nastaven pomocí parametrů z pohybové rovnice. Délka prvků sítě je nastavena na 1,5 mm. Pouze ve vzduchové mezeře je zvolena hustější síť s délkou prvků 0,25 mm.

Po nastavení parametrů je provedena simulace rozběhu, jejíž délka je 1,5 s. Po prvotním nárůstu otáček nastává tlumený kmitavý děj s nejvyšší amplitudou kmitu 500 ot./min. K ustálení otáček dochází až po čase 1 s. Průběh momentu má v celé délce silně kmitavý charakter, což není ideální. Nejvyšší podíl na celkových ztrátách stroje mají podle předpokladu Jouleovy ztráty ve vinutí statoru. Ztráty v kleci, železe i mechanické jsou oproti ztrátám ve statoru čtyřikrát i vícekrát menší. Záběrný proud dosahuje hodnot 35 A, což je asi šestnásobek maximální ustálené hodnoty proudu 6 A. Sycení stroje nabývá ve většině jha stroje hodnot 1,2 až 1,4 T. Účinnost stroje je vypočtena na 86,85 % s účínkem 0,6966. Při zkoumání stroje s různým zatížením je zjištěno, že maximální účinnost vykazuje stroj při 75 a 100 % zatížení, naopak nejvyšší účíník vykazuje stroj při 150 % zatížení. S rostoucím zatížením klesá amplituda kmitů při rozběhu a k ustálení otáček dochází už při čase 0,5 s.

V poslední části je provedena parametrická analýza stroje a sledují se změny jeho vlastností. Nejprve jsou prozkoumány dvě varianty rotoru se čtyřmi bariérami toku. Druhá z těchto verzí vychází s mnohem rychlejším rozběhem, kdy ustálení otáček nastává už při čase 0,4 s. Poté jsou počítány další varianty V2, V3, V4, V6 se třemi bariérami, které mají všechny rychlejší ustálení než referenční model rotoru. Prvotní verze rotoru má i přes delší dobu ustálení otáček nejvyšší hodnotu účinnosti a účíníku.

Pro dlouhodobý provoz v ustáleném stavu je důležitá hodnota účinnosti i účíníku, a proto je pro tento druh provozu nejlepší referenční varianta rotoru se třemi bariérami (V1). Z hlediska rychlého ustálení otáček při rozběhu má nejlepší parametry verze rotoru V2 se třemi bariérami nebo druhá varianta rotoru se čtyřmi bariérami.

# Literatura

- [1] NACEUR, Kamel Ben, Laura COZZI a Tim GOULD. World Energy Outlook 2016 [online]. Francie: International Energy Agency, 2016 [cit. 2018-10-23]. ISBN 978-92-64-26495-3. Dostupné z: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/WorldEnergyOutlook2016ExecutiveSummaryEnglish.pdf>
- [2] MOGHADDAM, Rajabi. Synchronous Reluctance Machine (SynRM) in Variable Speed Drives (VSD) Applications. Švédsko, Stockholm, 2011. Dizertační práce. KTH School of Electrical Engineering and Computer Science, Stockholm.
- [3] ABRAMENKO, Vallerii. Synchronous Reluctance Motor in Direct Online Applications. Lappeenranta, 2016. Magisterská práce. Lappeenranta University of Technology. Vedoucí práce Professor Juha Pyrhönen.
- [4] ABB. IEC 60034-30-1 standard on efficiency classes for low voltage AC motors [online]. 2018 [cit. 2018-10-30]. Dostupné z: [https://library.e.abb.com/public/0451229996ff4b0786505fd9a4075645/9AKK107319%20EN%2005-2018\\_20848\\_ABB\\_Technical\\_note\\_IEC\\_60034\\_30\\_1.pdf](https://library.e.abb.com/public/0451229996ff4b0786505fd9a4075645/9AKK107319%20EN%2005-2018_20848_ABB_Technical_note_IEC_60034_30_1.pdf)
- [5] MOGHADDAM, Rera Rajabi. Synchronous Reluctance Machine (SynRM) Design. Stockholm, 2017. Magisterská práce. Royal Institute of Technology, Department of Electrical Engineering. Vedoucí práce Dr. Freddy Magnussen.
- [6] BÁRTA, Jan. Výpočet synchronizovaného asynchronního motoru. Brno, 2012. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Čestmír Ondrůšek.
- [7] VÍTEK, Ondřej. Synchronní reluktanční motory: přednášky Elektrické pohony MEMI, VUT FEKT [online]. In: . [cit. 2018-11-07].
- [8] FUKAMI, Tadashi, Masatoshi MOMIYAMA, Kazuo SHIMA, Ryoichi HANAOKA a Shinzo TAKATA. Steady-State Analysis of a Dual-Winding Reluctance Generator With a Multiple-Barrier Rotor [online]. In: . červen 2018 [cit. 2018-11-09].
- [9] PYRHÖNEN, Juha, Valéria HRABOVCOVÁ a R.Scott SEMKEN. Electrical Machine Drives Control: An introduction [online]. Spojené království: John Wiley, 2016 [cit. 2018-11-09]. ISBN 9781119260448.
- [10] HRABOVCOVÁ, Valéria a Miroslav LIČKO. *Reluktančný synchronný motor*. Žilinská univerzita v Žiline: ŽU, 2001. ISBN 80-7100-891-5.
- [11] ABB. IE4 SynRM motor-drive packages: Super premium efficiency for industry [online]. In: . 2018 [cit. 2018-12-22]. Dostupné z: <https://search-ext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=3AUA0000132610&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>

- [12] Magnet-free motor technology for fixed speed applications reaching “IE5” efficiency level [online]. ABB, 2015 [cit. 2018-12-22]. Dostupné z: [https://library.e.abb.com/public/886669946d5e4687b914fb76fefdb460/Article\\_%20Magnet-free%20motor%20technology%20for%20fixed%20speed%20applications\\_September%202015\\_lowres\\_v2.pdf](https://library.e.abb.com/public/886669946d5e4687b914fb76fefdb460/Article_%20Magnet-free%20motor%20technology%20for%20fixed%20speed%20applications_September%202015_lowres_v2.pdf)
- [13] GAMBA, M., G. PELLEGRINO, A. VAGATTI a F. VILLATA. *Design of Line-Start Synchronous Reluctance motor*. 2013. Politecnico di Tirino, Department of Energy, Torino, Italy.
- [14] ABRAMENKO, Valerii, Ilya PETROV a Juha PYRHÖNEN. Analysis of Damper Winding Designs for Direct-On- Line Synchronous Reluctance Motor [online]. In: . Lappeenranta University of Technology, 2017 [cit. 2019-04-03]. DOI: 10.1109/IECON.2017.8216305.
- [15] PELLEGRINO, Gianmario, Thomas M. JAHNS, Nicola BIANCHI, Wen L. SOONG a Francesco CUPERTINO. The Rediscovery of Synchronous Reluctance and Ferrite Permanent Magnet Motors: Tutorial Course Notes [online]. Švýcarsko: Springer, 2016 [cit. 2018-11-25]. ISBN 78-3-319-32202-5.
- [16] Giacomo Bacco, fluid: Free Fluid Flux-Barriers Rotor for Synchronous Reluctance Motor Drawing, GitHub, 2018.Dostupné z: <https://github.com/gbacco5/fluid>
- [17] BACHOREC, Tibor. Prezentace - Modelování elektromagnetických polí: Magnetostatická analýza I. VUT FEKT v Brně.
- [18] BÁRTA, Jan. Modelování a výpočet indukčních strojů v ANSYS. VUT FEKT v Brně, 2018.
- [19] PYRHÖNEN, Juha, Tapani JOKINEN a Valéria HRABOVCOVÁ. *DESIGN OF ROTATING ELECTRICAL MACHINES*. Druhé vydání. Spojené Království: John Wiley, 2014. ISBN 978-1-118-58157-5.

# Seznam symbolů a zkratek

## Zkratky:

FEKT	Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
VUT	Vysoké učení technické v Brně
IEC	International Electrotechnical Commission
SynRM	Synchronní reluktanční motor
DOL	Direct online application

## Symboly:

$\psi$	magnetický tok	[Wb]
$\psi_d$	magnetický tok v ose d	[Wb]
$\psi_q$	magnetický tok v ose q	[Wb]
$\delta$	zátěžný úhel	[°]
$\varphi$	fázový posun mezi proudem a napětím	[°]
$\alpha$	fázový posun mezi celkovým proudem a proudem osou d	[°]
M	moment	[Nm]
$M_{em}$	elektromagnetický moment	[Nm]
$M_z$	zátěžný moment	[Nm]
$M_{mech}$	moment potřebný pro překonání tření	[Nm]
P	výkon	[W]
$P_{mech}$	mechanický výkon	[W]
$P_{ztr,mech}$	mechanické ztráty	[W]
$P_{J,s}$	Jouleovy ztráty ve vinutí statoru	[W]
$P_{J,s}$	Jouleovy ztráty v kleci	[W]
$P_{\Sigma}$	ztráty v železe	[W]
$u_d$	napětí v ose d	[V]
$u_q$	napětí v ose q	[V]
$i_d$	proud statoru v ose d	[A]
$i_q$	proud statoru v ose q	[A]
$i_D$	proud rotoru v ose d	[A]

$i_Q$	proud rotoru v ose q	[A]
$R_s$	odpor statoru	[ $\Omega$ ]
$\omega_r$	otáčky rotoru	[ot./min]
$\omega_s$	otáčky statoru	[ot./min]
$L_d$	indukčnost v ose d	[H]
$L_q$	indukčnost v ose q	[H]
$L_{\sigma}$	rozptylová indukčnost	[H]
$L_{md}$	magnetizační indukčnost v ose d	[H]
$L_{mq}$	magnetizační indukčnost v ose q	[H]
$p$	počet pólpárů	[-]
$m$	počet fází	[-]
$r$	poloměr	[m]
$\theta, \vartheta$	úhly v polárních souřadnicích	[°]
$C$	konstanta siločáry pole	[-]
$a$	vnitřní poloměr rotoru	[m]
$\gamma$	úhel oblouku magnetické bariéry	[°]
$a, b, c$	rozměry trojúhelníku oblouku	[m]
$q$	počet drážek na pól a fázi	[-]
$\tau_p$	cívkový krok	[-]
$A_z$	magnetický vektorový potenciál v ose z	[Wb/m]
$Q_s$	počet drážek statoru	[-]
$J$	moment setrvačnosti	[kg/m <sup>2</sup> ]
$\beta$	úhlové zrychlení	[rad/s <sup>2</sup> ]
$\lambda$	faktor tlumení	[Nms/rad]
$\omega$	úhlová frekvence	[rad/s]
$k$	směrnice zátěžného momentu	[-]
$k_v$	koeficient výroby plechů	[-]
$N$	počet vodičů v drážce	[-]
$n$	otáčky	[ot./min]